

П. М. Тихомиров

РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Москва, издательство "Энергия", 1976 г.

П. М. ТИХОМИРОВ

РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**ИЗДАНИЕ ЧЕТВЕРТОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ**

Допущено Министерством высшего и
среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия для студентов
вузов, обучающихся по специальности
«Электрические машины»



«ЭНЕРГИЯ» МОСКВА 1976

6П2.1.081

Т46

УДК 621.314.21.001.24(075.8)

Тихомиров П. М.

Т 46 Расчет трансформаторов. Учеб. пособие для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1976. 544 с. с ил.

В книге приведены основные сведения по теории расчета трансформаторов, подробно изложена методика проектирования силовых трансформаторов с плоскими и пространственными магнитными системами из холоднокатаной электротехнической стали, с обмотками из медного и алюминиевого провода и даны практические примеры расчета. Книга содержит необходимые для расчета сведения по конструкции магнитных систем, обмоток, систем охлаждения современных силовых трансформаторов и справочные материалы.

Книга предназначена для студентов энергетических и электротехнических вузов в качестве учебного пособия при курсовом и дипломном проектировании и при изучении курса «Проектирование электрических машин», а также может быть полезна инженерам и техникам, работающим в области проектирования, производства, эксплуатации и ремонта трансформаторов.

Т $\frac{30307-228}{051(01)-76}$ 67-76

6П2.1.081

ПРЕДИСЛОВИЕ

Четвертое издание книги «Расчет трансформаторов», переработанное и дополненное, выходит в свет через 7 лет после выхода третьего издания. За эти годы советское трансформаторостроение продолжало увеличивать выпуск силовых трансформаторов с одновременным расширением шкал мощностей и напряжений. Мощность трехфазного трансформатора в одной единице достигла 1000 МВ·А, высшее напряжение трансформатора 1150 кВ. Проектируются и выпускаются заводами серии трансформаторов с новыми конструкциями магнитных систем, обмоток и систем охлаждения. Совершенствуется технология производства трансформаторов. Развиваются работы по исследованию полей рассеяния, добавочных потерь в трансформаторах, механических сил при коротких замыканиях, систем охлаждения и др. Разрабатываются новые методы расчета различных параметров трансформаторов с широким использованием находящихся в распоряжении научных учреждений и заводов средств вычислительной техники.

При переработке книги для нового издания автор стремился дать читателю методику и материалы для рационального расчета силовых трансформаторов с учетом современных конструктивных решений отдельных частей и всего трансформатора в целом и новой прогрессивной технологии изготовления некоторых узлов трансформатора. Соответствующие краткие сведения о новых конструкциях магнитных систем и обмоток и отдельных технологических операциях в объеме, необходимом для расчета, приведены в некоторых главах книги.

В последние годы в Советском Союзе и за рубежом ведутся работы по исследованию магнитного поля рассеяния и электрического поля трансформатора. В результате этих исследований разрабатываются методы расчета добавочных потерь в обмотках и конструктивных деталях трансформатора и методы расчета механических

сил на основе расчета поля рассеяния, а также расчета изоляции трансформатора на основе расчета электрического поля. Расчетные методики для этих чрезвычайно сложных явлений отличаются большой сложностью, как правило, требуют применения средств вычислительной техники, и их описание не может быть изложено в ограниченном объеме книги. Поэтому автор стремился дать в новом издании лишь некоторые наиболее простые методы учета этих явлений и сообщить рекомендации по конструкциям магнитных систем и обмоток, позволяющие ограничить отрицательное влияние поля рассеяния на параметры трансформатора.

Вопросы расчета основных размеров трансформатора выделены в особую главу (гл. 3). Материал ее позволяет подойти к выбору основных размеров с учетом конструкции магнитной системы (плоской или пространственной) и марки электротехнической стали; конструкции и материала обмоток (медных или алюминиевых); получения заданных параметров холостого хода и короткого замыкания и некоторых других.

Методика расчета трансформатора, изложенная в гл. 3 и последующих главах, и справочные материалы, приведенные в книге, позволяют вести электрический, магнитный и тепловой расчеты силовых масляных и сухих трансформаторов общего назначения двух- и трехобмоточных различных мощностей от 4—10 кВ·А до 63—80 тыс. кВ·А классов напряжения до 110 кВ включительно.

Основное назначение книги — служить пособием студентам энергетических и электротехнических высших учебных заведений при курсовом и дипломном проектировании, а также при изучении курса проектирования электрических машин. Она может быть использована также студентами техникумов. Автор надеется, что книга окажется полезной и инженерам, работающим в области проектирования, исследования, производства, эксплуатации и ремонта трансформаторов.

Для удобства пользования книгой все необходимые практические указания и справочные материалы расположены в тексте по мере изложения теории и методики расчета. Книга иллюстрируется примерами расчета. По отдельным существенным вопросам, которые ввиду ограниченного объема книги не могли быть освещены с достаточной полнотой, в частности, по расчету поля рас-

сеяния и механических сил в обмотках при коротком замыкании, в списке литературы приведены наименования нескольких статей.

При составлении книги автор использовал опыт преподавания проектирования трансформаторов в Московском энергетическом институте, а также опыт Московского электрозавода, Запорожского трансформаторного завода, Армэлектрозавода, Всесоюзного электротехнического института имени В. И. Ленина, Всесоюзного института трансформаторостроения. Автор пользуется случаем выразить свою признательность работникам этих предприятий, оказавшим содействие в подборе материала для книги, докт. техн. наук, проф. Б. Б. Гельперину, выполнившему большую работу по рецензированию рукописи, а также инж. Н. А. Акимовой, выполнившей часть расчетов.

Все замечания по книге автор просит направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., д. 10, изд-во «Энергия».

Автор

Глава первая

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

1-1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ В СССР

Централизованное производство электрической энергии на крупных электростанциях с генераторами большой единичной мощности, размещаемых вблизи расположения топливных и гидравлических энергоресурсов, позволяет получать в этих районах большие количества электрической энергии при относительно невысокой ее стоимости. Реальное использование дешевой электрической энергии непосредственно у потребителей, находящихся на значительном удалении, иногда измеряемом сотнями и тысячами километров, и рассредоточенных на территории страны, требует при этом создания сложных разветвленных электрических сетей.

Силовой трансформатор является одним из важнейших элементов каждой электрической сети. Передача электрической энергии на большие расстояния от места ее производства до места потребления требует в современных сетях не менее чем пяти-шестикратной трансформации в повышающих и понижающих трансформаторах. Так, при напряжении на шинах электростанции 15,75 кВ в современной сети часто применяется такая последовательность шести трансформаций напряжения с учетом падения напряжения на линиях передачи: 15,75 на 525 кВ; 500 на 242 кВ; 230 на 121 кВ; 115 на 38,5 кВ; 35 на 11 кВ; 10 на 0,4 или 0,69 кВ.

Необходимость распределения энергии между многими мелкими потребителями приводит к значительному увеличению числа отдельных трансформаторов по сравнению с числом генераторов. При этом суммарная мощность трансформаторов в сети на каждой следующей сту-

пени с более низким напряжением в целях более свободного маневрирования энергией выбирается обычно большей, чем мощность предыдущей ступени более высокого напряжения. Вследствие этих причин общая мощность всех трансформаторов, установленных в сети, в настоящее время превышает общую генераторную мощность в 7—8 раз. В ближайшие 10—12 лет это отношение может повыситься.

Определяя место силового трансформатора в электрической сети, следует отметить, что по мере удаления от электростанции единичные мощности трансформаторов уменьшаются, а удельный расход материалов на изготовление трансформатора и потери, отнесенные к единице мощности, а также цена 1 кВт потерь возрастают. Поэтому значительная часть материалов, расходуемых на все силовые трансформаторы, вкладывается в наиболее отдаленные части сети, т. е. в трансформаторы с высшим напряжением 35 и 10 кВ. В этих же трансформаторах возникает основная масса потерь энергии, оплачиваемых по наиболее дорогой цене.

Решения XXV съезда КПСС по основным направлениям развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 гг. требуют:

«Создаваемые машины, оборудование, приборы и технологические процессы по своим технико-экономическим показателям на единицу производительности и другого полезного эффекта должны превосходить лучшие отечественные и мировые достижения».

В отношении силовых трансформаторов это требование относится прежде всего к уменьшению потерь энергии при эксплуатации трансформаторов. Коэффициент полезного действия трансформаторов очень велик и для большинства их составляет 98—99% и более, однако необходимость многократной трансформации энергии и установки в сетях трансформаторов с общей мощностью, в несколько раз превышающей мощность генераторов, приводит к тому, что общие потери энергии во всем парке трансформаторов достигают существенных значений. Так, в 1955 г. на потери в трансформаторах расходовалось до 6% всей энергии, выработанной электростанциями.

В сериях трансформаторов, разработанных после 1955 г., предусмотрено значительное снижение потерь на единицу мощности, однако вследствие увеличения числа

ступеней трансформации в сетях, роста общей мощности трансформаторного парка и наличия в сетях трансформаторов, выпущенных в прежние годы, общие потери в трансформаторах по-прежнему оцениваются как близкие к 6% выработанной энергии, что в 1974 г. составило по СССР около 58 млрд. кВт·ч. Поэтому одной из важнейших задач в настоящее время является задача существенного уменьшения потерь энергии в трансформаторах, т. е. потерь холостого хода и потерь короткого замыкания.

Уменьшение потерь холостого хода достигается главным образом путем все более широкого применения холоднокатаной рулонной электротехнической стали с улучшенными магнитными свойствами — низкими и особенно низкими удельными потерями и низкой удельной намагничивающей мощностью. Применение этой стали, обладающей анизотропией магнитных свойств и очень чувствительной к механическим воздействиям при обработке — продольной и поперечной резке рулона на пластины; к толчкам и ударам при транспортировке пластин; к ударам, изгибам и сжатию пластин при сборке магнитной системы и остова, сочетается с существенным изменением конструкций магнитных систем, а также с новой прогрессивной технологией заготовки и обработки пластин и сборки магнитной системы и остова.

Новые конструкции магнитных систем характеризуются применением косых стыков пластин в углах системы, стяжкой стержней и ярм кольцевыми бандажами вместо сквозных шпилек в старых конструкциях и многоступенчатой формой сечения ярма в плоских магнитных системах. Находят все более широкое применение стыковые пространственные магнитные системы со стержнями, собранными из плоских пластин, и с ярмами, навитыми из ленты холоднокатаной стали. Эта конструкция позволяет уменьшить расход активной стали и потери холостого хода при увеличении тока холостого хода.

Уменьшение потерь короткого замыкания достигается главным образом понижением плотности тока за счет увеличения массы металла в обмотках. В значительной мере это стало возможным после замены медного провода алюминиевым в силовых трансформаторах общего назначения мощностью до 16 000 кВт·А.

Повышение технического уровня различных видов продукции, в том числе и силовых трансформаторов, приводит к необходимости критической оценки параметров

этой продукции и разделения ее на категории, различающиеся по качеству. В настоящее время для силовых трансформаторов установлены три категории качества. Высшая категория — трансформаторы, основные показатели которых находятся выше среднего мирового уровня; первая категория — с показателями на среднем мировом уровне; вторая категория (трансформаторы, производство которых должно быть прекращено) — с показателями ниже среднего мирового уровня. В качестве основных критериев для отнесения трансформаторов к той или иной категории служат: уровни потерь холостого хода и короткого замыкания, уровень тока холостого хода, масса трансформатора, отнесенная к единице мощности и другие.

Одной из важных задач, поставленных в решениях XXV съезда КПСС по основным направлениям развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 гг., является повышение эффективности использования материальных ресурсов — сырья, материалов, топлива и энергии. В трансформаторостроении эта задача решается в сложном комплексе мероприятий, направленных на уменьшение расхода активных, изоляционных и конструктивных материалов и на уменьшение габаритов трансформатора.

Уменьшение расхода электротехнической стали при стабильности допустимой индукции достигается в настоящее время за счет изменения конструкции магнитной системы, например путем перехода от плоских к пространственным магнитным системам. В значительной части серий и типов силовых трансформаторов общего назначения мощностью до 16 000 кВ·А медь в обмотках заменена алюминием. Дальнейшее расширение применения алюминия в трансформаторах больших мощностей ограничивается требованиями механической прочности обмоток при коротком замыкании. Возможность замены меди алюминием в обмотках некоторых типов трансформаторов специального назначения еще не исчерпана.

Сокращение расхода изоляционных материалов, трансформаторного масла и металла, употребляемого на изготовление баков и систем охлаждения трансформаторов, достигается путем снижения испытательных напряжений и уменьшения изоляционных расстояний при улучшении изоляционных конструкций на основе совершенствования технологии обработки изоляции и применения новых средств защиты трансформаторов от перенапря-

жений. Большой эффект в деле экономии конструктивных материалов дает также применение новых систем форсированного охлаждения трансформаторов с направленной форсированной циркуляцией масла в каналах обмоток и эффективных охладителях.

В соответствии с решениями XXV съезда КПСС по основным направлениям развития народного хозяйства на 1976—1980 гг. должно быть освоено производство: турбогенераторов мощностью 1000—1200 тыс. кВт для атомных и тепловых электростанций, генераторов мощностью 640 тыс. кВт для гидроэлектростанций, комплексов высоковольтного оборудования для линий электропередачи постоянного тока напряжением до 1500 кВ и переменного тока до 1150 кВ, что потребует производства трансформаторов соответствующих мощностей до 1250—1500 тыс. кВт·А и классов напряжения до 1150 и 1500 кВ. Рост единичных мощностей и номинальных напряжений советских трансформаторов по годам показан в табл. 1-1.

На рис.1-1 показана фотография одного из современных мощных трансформаторов — однофазного автотрансформатора мощностью 417 МВ·А (1250 МВ·А в трехфазной группе) класса напряжения 750 кВ, установлен-

Таблица 1-1

Рост мощностей и напряжений советских трансформаторов по годам

Год выпуска	Число фаз	Мощность, кВт·А	Напряжение ВН, кВ	Год выпуска	Число фаз	Мощность, кВт·А	Напряжение ВН, кВ
1931	1	3333	110	1963	3	400 000	330
1933	1	20 000	220	1967	3	630 000	220
1939	1	40 000	220	1967	1	417 000	750
1955	3	70 000	110	1969	3	400 000	500
1956	1	135 000	400	1971	3	1 000 000	330
1959	1	135 000	500	1972	1	210 000	1150
1959	3	240 000	220				

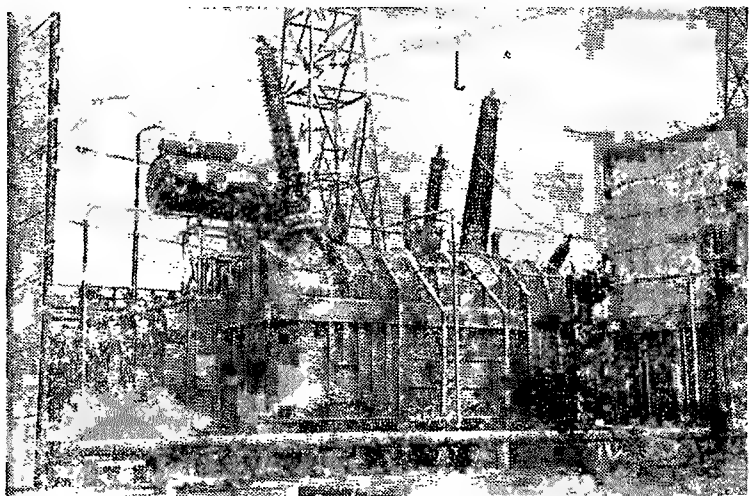


Рис. 1-1. Однофазный автотрансформатор мощностью 417 МВ·А класса напряжения 750 кВ на подстанции.

ного на подстанции. Линейные напряжения обмоток (в группе) ВН 750 кВ, СН 500 кВ, НН 10,6 кВ, мощности обмоток ВН и СН 417 МВ·А, НН 30 МВ·А. Система охлаждения трансформатора состоит из двух групп охладителей, установленных на отдельных фундаментах. Циркуляция масла внутри бака трансформатора и охладителей форсируется насосами, движение воздуха, обдувающего охладители, — вентиляторами. От воздействия атмосферных разрядов трансформатор защищен разрядниками, установленными поблизости.

В связи с повышением общих требований, предъявляемых энергетикой к силовым трансформаторам, расширением шкалы мощностей и напряжений и существенным улучшением параметров холостого хода и короткого замыкания в последние годы продолжалась работа по стандартизации силовых трансформаторов. В 1969—1972 гг. были утверждены новые государственные стандарты на трансформаторы общего назначения классов напряжения 150, 220, 330 и 500 кВ, а также на некоторые специальные трансформаторы — рудничные, преобразовательные, заполненные негорючей жидкостью и т. п., и

стандарты по нагрузочной способности и на термины и определения в области силовых трансформаторов.

Постоянное повышение верхнего предела номинальных мощностей и напряжений силовых трансформаторов сопровождается увеличением типовых мощностей, нарастающих по стандартизованной шкале с основным коэффициентом нарастания, равным 1,6 (в отдельных местах шкалы 1,25). Введены также новые стандартные напряжения для обмоток высшего и низшего напряжений, увеличивается выпуск трансформаторов специального назначения — для питания электрических печей, преобразовательных устройств, рудничных установок и других, а также трансформаторов для комплектных трансформаторных подстанций. Вследствие этого постоянно увеличивается номенклатура изделий трансформаторного производства и становится необходимым более четкое разделение выпуска трансформаторов по мощностям и классам напряжения между отдельными заводами, а также сосредоточения на отдельных заводах производства однотипных трансформаторов.

В последние годы все больше увеличивается выпуск так называемых сухих трансформаторов с естественным воздушным охлаждением. Они находят все более широкое применение в установках внутри производственных помещений, жилых и служебных зданий, т. е. там, где установка масляных трансформаторов вследствие их взрыво- и пожароопасности недопустима. Мощность в единице этих трансформаторов достигает в нормальных сериях 1600 кВ·А при напряжении 10 кВ. В дальнейшем возможно увеличение единичной мощности до 2500 кВ·А и напряжения до 15 кВ. Помимо серий сухих трансформаторов для работы в зоне умеренного климата возникает необходимость их выпуска для работы в условиях сухих и влажных тропиков.

Для обеспечения экономичности работы электрических сетей и надлежащего качества энергии, отпускаемой потребителям, т. е. для поддержания постоянства напряжения возникает необходимость в расширении выпуска трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН). Современными стандартами предусмотрен выпуск всех понижающих трансформаторов и автотрансформаторов классов напряжения 110, 150, 220, 330 и 500 кВ, а также части трансформаторов класса напря-

жения 35 кВ мощностью от 10 000 до 63 000 кВ·А с регулированием напряжения под нагрузкой. При этом у двух- и трехобмоточных трансформаторов, как правило, напряжение регулируется при помощи устройства для переключения ответвлений в нейтрали обмотки высшего напряжения. У автотрансформаторов напряжение регулируется у линейного конца обмотки среднего напряжения и в отдельных случаях вблизи нейтрали обмоток. Повышающие трансформаторы этих классов напряжения выпускаются без РПН.

Трансформаторы классов напряжения 10 и 35 кВ мощностью от 63 до 6300 кВ·А также могут иметь устройство РПН, однако выпускаются обычно с переключением без возбуждения (ПВВ).

При разработке трансформаторов и особенно автотрансформаторов большой мощности (более 63 000 кВ·А) возникает проблема ограничения потерь, возникающих от вихревых токов, наводимых магнитным полем рассеяния. Эти потери в некоторых трансформаторах могут достигать 30—40% и более от полных потерь короткого замыкания.

В качестве наиболее эффективных средств для уменьшения добавочных потерь применяют: рациональное размещение витков обмоток для уменьшения поперечной (радиальной) составляющей поля рассеяния, искусственную локализацию поля рассеяния при помощи установки магнитных шунтов из электротехнической стали и замену некоторых стальных деталей деталями из немагнитных материалов. В дальнейшем наиболее радикальное решение этой проблемы может быть найдено путем замены стальных деталей, в которых возникают потери от гистерезиса и от вихревых токов, немагнитными (прессующие кольца обмоток, ярмовые прессующие балки и т. д.) или деталями из немагнитных металлов (стенка бака).

Широкое развитие электрификации железных дорог должно быть обеспечено выпуском достаточного количества трансформаторов для питания выпрямителей, а также специальных трансформаторов для установки на электровозах, работающих на участках, питаемых переменным током. Значительно должны быть расширены выпуск и диапазон мощностей трансформаторов для питания электрических печей, трансформаторов, заполненных негорючей жидкостью, и различных реакторов.

Разработка новых серий трансформаторов с пониженными потерями производится на базе применения холоднокатаной электротехнической рулонной стали лучших марок по ГОСТ 802-58 с низкими и особо низкими удельными потерями, допускающей магнитную индукцию до 1,6—1,65 Т. В качестве материала обмоток в значительной части силовых трансформаторов общего назначения для мощностей до 16 000—25 000 кВ·А применяется алюминиевый обмоточный провод. В трансформаторах больших мощностей и трансформаторах специального назначения обмотки выполняются из медного обмоточного провода.

Перевод ряда серий трансформаторов на алюминиевые обмотки позволил получить большую экономию меди, необходимой для общего увеличения выпуска трансформаторов и для увеличения массы меди в обмотках трансформаторов большой мощности с целью уменьшения потерь короткого замыкания.

Задача проектирования рациональной серии трансформаторов с алюминиевыми обмотками заключается в выборе такого соотношения основных размеров, отличающихся от размеров трансформаторов с медными обмотками, при котором наиболее полно использовалось бы положительное свойство алюминия — малая плотность, и уменьшалось бы значение отрицательных свойств — относительно большого удельного электрического сопротивления, увеличенного объема обмоток и пониженной механической прочности провода.

Для получения в эксплуатации полной взаимозаменяемости трансформаторов с медными и алюминиевыми обмотками целесообразно проектировать те и другие с одинаковыми параметрами — потерями и напряжением короткого замыкания, потерями и током холостого хода. Практика расчета серий «алюминиевых» трансформаторов показывает, что взаимозаменяемость их с «медными» трансформаторами может быть получена при одинаковых исходных данных расчета, т. е. одинаковых марке стали, магнитной индукции в стержне, коэффициенте заполнения сталью сечения стержня и т. д. При этом трансформаторы с алюминиевыми обмотками имеют одинаковую с «медными» трансформаторами массу стали, меньшую массу, но больший объем металла обмоток, большее сечение обмоток, большую высоту магнитной системы.

Увеличение сечения витка алюминиевых обмоток в достаточной мере увеличивает их механическую прочность при коротком замыкании, компенсируя в трансформаторах мощностью до 16—25 тыс. кВ·А пониженную механическую прочность самого металла.

Большой опыт выпуска трансформаторов с алюминиевыми обмотками, в частности в пределах номинальных мощностей от 10 до 16 000 кВ·А, показал, что эти трансформаторы обеспечивают полноценную замену трансформаторов с медными обмотками, так как могут иметь те же параметры холостого хода и короткого замыкания при одинаковой стоимости всего трансформатора, т. е. являются равноценными с «медными» трансформаторами в техническом и экономическом отношении.

В последние годы усиливается интерес к применению электрооборудования, в том числе и трансформаторов, работающего в электрических системах с повышенной частотой 100—400 Гц. С ростом частоты уменьшается масса электрооборудования (двигателей, трансформаторов и др.) и появляется возможность применения высокоскоростного электропривода. Повышенная частота используется там, где применяется ручной высокоскоростной электроинструмент с электроприводом, на лесоразработках и горных разработках на морских и речных судах, в прядильных цехах для электропривода веретен, для электроплавки и электросварки металлов и т. д. Рост мощностей автономных электрических систем повышенной частоты уже сейчас ставит задачу создания силовых энергетических трансформаторов, рассчитанных на частоты 100—400 Гц.

Выполнение решений XXV съезда КПСС по повышению технического уровня, экономичности и качества всех видов продукции в области трансформаторостроения требует развития теоретических и прикладных научно-исследовательских работ.

Исследования поля рассеяния трансформаторов больших мощностей необходимы для создания точных методов расчета распределения поля рассеяния и вызываемых им механических сил, воздействующих на обмотки при коротком замыкании. Точное знание сил, действующих на обмотки и их отдельные части, позволит обеспечить электродинамическую стойкость и надежность трансформаторов мощностью 250—1000 МВ·А и более. Исследования поля рассеяния трансформаторов этих и меньших мощностей имеют целью также определенную организацию и локализацию этого поля за счет рационального размещения обмоток и применения различных магнитных шунтов и экранов, позволяющих существенно уменьшить добавочные потери в обмотках и конструктивных деталях трансформатора — стенках бака, прессующих деталях обмоток и остова трансформатора.

Важнейшим направлением научно-исследовательских работ является разработка новых прогрессивных технологических процессов

и операций, обеспечивающих повышение качества трансформаторов, уменьшение трудовых затрат и экономию материалов. Особое значение имеет совершенствование сушки активных частей трансформаторов классов напряжения 220, 330, 500 и 750 кВ и разработка метода сушки для трансформаторов класса напряжения 1150 кВ. Правильно организованная и проведенная сушка является залогом длительной и надежной работы изоляции трансформатора в эксплуатации.

Повышение класса напряжения трансформаторов с 220 до 300, 500, 750 и 1150 кВ требует развития исследований новых изоляционных конструкций и применения изоляционных материалов повышенного качества. В области трансформаторов массовых выпусков мощностью от 25 до 1000—6300 кВ·А главной задачей остается совершенствование их конструкций с целью уменьшения расхода материалов, снижения потерь энергии в них, удешевления производства.

Особое развитие должны получить работы по исследованию шума трансформаторов — нормированию его уровня, разработке методов измерения и понижения уровня шума.

Все более широко будет использоваться современная вычислительная техника как при выполнении различных исследований, так и для расчета новых типов и серий трансформаторов в условиях заводов.

Совершенно обособленную часть области трансформаторостроения представляют трансформаторы малой мощности, т. е. трансформаторы, мощность которых измеряется в пределах от долей вольт-ампера до 3000—5000 В·А, используемые в радиотехнике, телевидении, радиоэлектронике, автоматике, устройствах связи и т. д. Массовый выпуск этих трансформаторов, измеряемый в СССР несколькими десятками миллионов штук в год, при общем расходе активных материалов, достигающем до 40—50% расхода материалов на все силовые трансформаторы, организуется на специализированных заводах. Методика проектирования этих трансформаторов существенно отличается от методики проектирования силовых трансформаторов.

1-2. СТАНДАРТИЗАЦИЯ В ТРАНСФОРМАТОРОСТРОЕНИИ

Одной из задач стандартизации в трансформаторостроении является установление единых требований к трансформаторам, отражающих потребности эксплуатации и условия работы силовых трансформаторов в сетях, с одной стороны, и современное состояние и возможности трансформаторостроения, с другой. Фиксируя определенное состояние трансформаторостроения, стандарт в то же время ставит новые требования, стимулирующие дальнейший прогресс в производстве трансформаторов. Периодический пересмотр стандартов и повышение установленных в них требований позволяют систематически совершенствовать существующие серии трансформаторов — улучшать их энергетические показатели, повы-

шать надежность, уменьшать массу и габариты и создавать новые типы трансформаторов.

В результате работы, проведенной за последние десять лет в электротехнической промышленности и в Государственном комитете стандартов Совета Министров СССР, был создан ряд стандартов, определяющих основные требования, предъявляемые к силовым трансформаторам классов напряжения от 6 до 500 кВ для мощностей от 25 до 1 000 000 кВ·А.

Эти стандарты можно подразделить на три группы.

Стандарты, содержащие требования, общие для всех силовых трансформаторов:

ГОСТ 9680-61. Ряды номинальных мощностей.

ГОСТ 11677-75. Общие технические требования.

ГОСТ 3484-65. Методы испытаний.

ГОСТ 1516-73. Нормы и методы испытаний электрической прочности.

ГОСТ 14209-69. Нагрузочная способность.

ГОСТ 16110-70. Термины и определения.

Стандарты, содержащие основные параметры и технические требования для отдельных серий трансформаторов общего назначения, согласно табл. 1-2.

Таблица 1-2

Государственные стандарты, содержащие основные параметры и технические требования для трансформаторов (и автотрансформаторов) общего назначения

ГОСТ	Параметры трансформаторов			
	Вид охлаждения	Число фаз	Класс напряжения, кВ	Диапазон мощностей, кВ·А
ГОСТ 12022-66	Масляное	3	До 35 вкл.	25—630
ГОСТ 11920-73	»	3	До 35 вкл.	1000—80 000
ГОСТ 12965-74	»	3	110	2500—400 000
ГОСТ 17546-72	»	3	150	4000—400 000
ГОСТ 15957-70	»	3	220	25 000—630 000
ГОСТ 17545-72	»	1 и 3	330	32 000—1 000 000
ГОСТ 17544-72	»	1 и 3	500	125 000—630 000
ГОСТ 14074-68	Воздушное	3	6—15,75	25—1600

Стандарты, содержащие основные параметры и технические требования для трансформаторов специального назначения — рудничных, электропечных, преобразовательных и других.

Номинальные мощности силовых трехфазных трансформаторов и автотрансформаторов определяются ГОСТ 9680-61 и представлены в табл. 1-3. Номинальные мощности однофазных трансформаторов и автотрансформаторов, предназначенных для работы в трехфазной группе, должны составлять $\frac{1}{3}$ номинальных мощностей, приведенных в табл. 1-3.

Таблица 1-3

**Ряды номинальных мощностей силовых трансформаторов
и автотрансформаторов
(ГОСТ 9680-61), кВ·А**

1	2	3	4	5
10	—	16	—	25
100	—	160	—	250
1000	—	1600	—	2500
10 000	—	16 000	—	25 000
100 000	125 000	160 000	200 000	250 000

Продолжение

6	7	8	9	10
—	40	—	63	—
—	400	—	630	—
—	4000	—	6300	—
32 000	40 000	—	63 000	80 000
820 000	400 000	500 000	630 000	800 000

Номинальные напряжения силовых трансформаторов определяются ГОСТ 721-74. В табл. 1-4 приведены номинальные напряжения сетей и номинальные междуфазные (линейные) напряжения первичных и вторичных обмоток трехфазных трансформаторов, присоединяемых к этим сетям.

Общие технические требования, предъявляемые к силовым трансформаторам и автотрансформаторам общего назначения, масляным и сухим, трехфазным мощностью 6,3 кВ·А и более и однофазным более 4 кВ·А, классов напряжения до 750 кВ включительно установлены стандартом ГОСТ 11677-75. Этот стандарт устанавливает область применения и определяет: условия работы, классификацию видов охлаждения, нормы нагрева, номинальные параметры и нагрузочную способность, допустимые превышения напряжения, электри-

Номинальные междофазные (линейные) напряжения, кВ

Сети и прием- ники	Трансформаторы и автотрансформаторы без РПН		Трансформаторы и автотрансформаторы с РПН		Наибольшее рабо- чее напряжение
	Первичные обмотки	Вторичные обмотки	Первичные обмотки	Вторичные обмотки	
0,22	0,22	0,23	—	—	—
0,38	0,38	0,40	—	—	—
0,66	0,66	0,69	—	—	—
3	3 и 3,15	3,15 и 3,3	—	3,15	3,6
6	6 и 6,3	6,3 и 6,6	6 и 6,3	6,3 и 6,6	7,2
10	10 и 10,5	10,5 и 11,0	10 и 10,5	10,5 и 11,0	12,0
20	20	22	20 и 21,0	22,0	24,0
35	35	38,5	35 и 36,75	38,5	40,5
110	—	121	110 и 115	115 и 121	126
150	—	165	158	158	172
220	—	242	220 и 230	230 и 242	252
330	330	347	330	330	363
500	500	525	500	—	525
750	750	787	750	—	787

ческую прочность изоляции, схемы и группы соединения обмоток, виды переключения ответвлений обмоток, допустимые уровни шума, стойкость при коротких замыканиях и толчках нагрузки, допуски для величин, предусмотренных в стандартах, общие конструктивные требования, требования к документации, требования к надежности, правила приемки, методы испытаний, правила маркировки, упаковки, транспортировки и хранения трансформаторов, гарантии изготовителя.

Общие конструктивные требования в ГОСТ 11677-75 относятся к вводам, зажимам и трансформаторам тока; определяют необходимые условия для защиты масла трансформатора от окисления и поверхностей его частей и деталей от коррозии; устанавливают емкость расширителя и комплектацию его необходимой арматурой, а также конструктивную форму и прочность баков масляных трансформаторов, приспособления для подъема и перемещения трансформаторов, арматуру, приборы контроля уровня и температуры масла, защитные устройства, заземление и устройства контроля систем охлаждения.

Основные требования ГОСТ 11677-75, относящиеся к расчету трансформатора или используемые в расчете, отражены в гл. 6—9. Схемы и группы соединения обмоток, предусмотренные стандартом для трехфазных двухобмоточных трансформаторов, приведены в табл. 1-5. Для трехфазных трехобмоточных трансформаторов предусмотрены два сочетания схем и групп соединения. Пользуясь условными обозначениями табл. 1-5, эти схемы и группы обозначают так: $У_n/U_n/D-0-11$ и $У_n/D/D-11-11$, принимая порядок следования обмоток ВН(СН)НН и порядок обозначения групп ВН—СН и ВН—НН.

Кроме ГОСТ 11677-75, содержащего общие технические требования к силовым трансформаторам, разрабатываются стандарты на отдельные серии трансформаторов, в которых для каждого типа трансформатора устанавливаются требования к сочетанию напряжений ВН и НН, к сочетанию схем соединения обмоток ВН и НН, параметрам холостого хода и короткого замыкания, размещению арматуры, габаритам, переключению ответвлений, арматуре и т. д.

Требования к трехфазным масляным силовым трансформаторам общего назначения мощностью от 25 до 630 кВ·А на напряжения до 35 кВ включительно регламентируются стандартом ГОСТ 12022-66. Для трехфазных масляных силовых трансформаторов мощностью 1000—80 000 кВ·А с верхним пределом номинального напряжения до 38,5 кВ утверждены ГОСТ 11920-73. Этими стандартами регламентированы сочетания стандартных напряжений ВН и НН, соответствующие сочетания схем и группы соединения обмоток, параметры холостого хода и короткого замыкания и ряд других данных, охватываемых стандартами на трансформаторы. Основные требования этих стандартов, относящихся к двухобмоточным трансформаторам, переключаемым без возбуждения (ПБВ), с нормальным (не повышенным) напряжением короткого замыкания, сгруппированы в табл. 1-6 и 1-7.

В последние годы были также переработаны и утверждены стандарты на методы испытаний силовых трансформаторов ГОСТ 3484-65, а также на испытание электрической прочности изоляции трансформаторов (ГОСТ 1516-73) и др.

Стандарт ГОСТ 12965-74 устанавливает основные параметры и технические требования к масляным трехфазным двух- и трехобмоточным трансформаторам общего назначения мощностью от 2,5 до

Схемы и группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов¹

Диаграммы векторов э. д. с.		Условные обозначения	
ВН	НН	в чертежах	в тексте
			$y / y_H - 0$
			$y / \Delta - 11$
			$y_H / \Delta - 11$
			$y / y_H - 11$
			$\Delta / y_H - 11$

¹ ГОСТ 11677-75 предусмотрена также схема Д/Д-0.

400 МВ·А на высшее напряжение 110 кВ, имеющим регулирование напряжения под нагрузкой (РПН), имеющим переключение без возбуждения (ПВВ) и не имеющим ответвлений для переключения.

Обмотки ВН, СН и НН трехобмоточных трансформаторов рассчитываются на полную номинальную мощность. Предусматривается порядок расположения обмоток от стержня наружу (НН—СН—ВН). Для трансформаторов 40 и 80 МВ·А допускается также расположение СН—НН—ВН.

Основные параметры трехфазных трансформаторов с напряжением ВН 110 кВ приведены в табл. 1-8. Напряжение короткого замыкания для двухобмоточных трансформаторов установлено $u_k = 10,5\%$; для трехобмоточных соответственно три значения: ВН—СН 10,5%, ВН—НН 17,0%; СН—НН 6,0%.

Государственные стандарты систематически пересматриваются и совершенствуются. Нормальным сроком для очередного пересмотра стандарта считается срок 5 лет.

**Параметры холостого хода и короткого замыкания
трехфазных масляных силовых трансформаторов,
отвечающих требованиям ГОСТ 11920-73**

Номинальная мощность, кВ·А	Класс напряжения, кВ	Потери, Вт				Напряжение короткого замыкания, %	Ток холостого хода, %
		холостого хода		короткого замыкания			
		уровень А	уровень Б	*	**		
1000	10	2100	2450	12 200	11 600	5,5	1,4
	35	2350	2750	12 200	11 600	6,5	1,5
1600	10	2800	3300	18 000	16 500	5,5	1,3
	35	3100	3650	18 000	16 500	6,5	1,4
2500	10	3900	4600	25 000	23 500	5,5	1,0
	35	4350	5100	25 000	23 500	6,5	1,1
4000	10	5450	6400	—	33 500	6,5	0,9
	35	5700	6700	—	33 500	7,5	1,0
6300	10	7650	9000	—	46 500	6,5	0,8
	35	8000	9400	—	46 500	7,5	0,9
10 000	38,5	12 300	14 500	—	65 000	7,5	0,8
16 000	38,5	17 800	21 000	—	90 000	8,0	0,6
40 000	38,5	31 000	36 000	—	165 000	8,5	0,4
80 000	38,5	53 000	60 000	—	280 000	9,0	0,3

Примечания: 1. Уровень В относится к трансформаторам, в которых использована сталь марки Э330А с толщиной 0,35 мм по ГОСТ 802-58 с жаростойким покрытием и отжигом пластин.

2. Знаком * отмечены потери короткого замыкания при номинальном напряжении обмоток НН 0,4; 0,525 и 0,69 кВ; знаком ** — при напряжениях НН 3,15; 6,3; 10,5 и 11 кВ.

**Параметры холостого хода и короткого замыкания
трехфазных масляных силовых трансформаторов
с напряжением ВН 110 кВ, отвечающих требованиям ГОСТ 12965-74**

Номинальная мощность, МВ·А	Двухобмоточные				Трехобмоточные			
	Потери, кВт			Ток холостого хода, %	Потери, кВт			Ток холостого хода, %
	холостого хода		короткого замыкания		холостого хода		короткого замыкания	
	Уровень А	Уровень Б			Уровень А	Уровень Б		
2,5	5,5	6,5	22	1,5	—	—	—	—
6,3	10	13	49	0,90	14	17	58	1,2
10	14	18	60	0,85	19	23	76	1,1
16	21	26	90	0,80	26	32	96	1,0
25	29	36	120	0,75	36	45	140	0,9
32	35	44	145	0,70	—	—	—	—
40	42	52	175	0,65	50	63	200	0,8
63	59	73	245	0,60	70	87	290	0,7
80	70	89	310	0,55	82	102	390	0,6
125	100	120	400	0,55	—	—	—	—
200	140	170	550	0,50	—	—	—	—
250	160	200	640	0,50	—	—	—	—
400	260	320	900	0,45	—	—	—	—

Примечание: Уровень потерь А относится к трансформаторам, изготовленным из электротехнической стали с удельными потерями $P_{15/50}$ не более 0,9 Вт/кг; уровень Б — не более 1,1 Вт/кг.

1-3. ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ТРАНСФОРМАТОРОСТРОЕНИИ

Развитие производства трансформаторов, так же как и любых других электрических машин и аппаратов, тесно связано с прогрессом в производстве магнитных, проводниковых и изоляционных материалов. В свою очередь задачи, стоящие перед трансформаторостроением, требуют от соответствующих отраслей промышленности разработки и выпуска новых видов и марок различных материалов.

Поиски новых материалов чаще всего имеют целью улучшение параметров трансформатора — уменьшение потерь энергии в трансформаторе, уменьшение его массы и размеров, повышение надежности работы. Возни-

кает также вопрос о замене дорогих материалов более дешевыми и о сокращении расхода некоторых материалов, в частности цветных металлов. Так, в последние годы в ряде стран в обмотках трансформаторов малой и средней мощности медный провод заменяется более дешевым алюминиевым.

Материалы, применяемые для изготовления трансформатора, разделяются на активные, т. е. сталь магнитной системы и металл обмоток и отводов; изоляционные, применяемые для электрической изоляции обмоток и других частей трансформатора, например электроизоляционный картон, фарфор, дерево, трансформаторное масло и др.; конструкционные, идущие на изготовление бака, различных крепежных частей и т. д., и прочие материалы, употребляемые в сравнительно небольших количествах. Применение того или иного материала может отразиться на технологии изготовления трансформатора и его конструкции. Замена одних активных или изоляционных материалов другими иногда приводит к существенному изменению конструкции трансформатора.

Одним из основных активных материалов трансформатора является тонколистовая электротехническая сталь. В течение многих лет для магнитных систем трансформаторов применялась сталь горячей прокатки с толщиной листов 0,5 или 0,35 мм. Качество этой стали постепенно улучшалось, однако удельные потери в ней были высоки.

Появление холоднокатаной текстурованной стали, т. е. стали с определенной ориентировкой зерен (кристаллов), имеющей значительно меньшие удельные потери и более высокую магнитную проницаемость, позволило увеличить индукцию в магнитной системе до 1,6—1,65 Т против 1,4—1,45 Т для горячекатаной стали и существенно уменьшить массу активных материалов при одновременном уменьшении потерь энергии в трансформаторе. Вместе с этим было получено уменьшение расхода остальных материалов — изоляционных, конструкционных, масла и т. д.

Применение холоднокатаной стали позволило также уменьшить внешние габариты и увеличить мощность трансформатора в одной единице, что особенно важно для трансформаторов большой мощности, внешние размеры которых ограничиваются условиями перевозки по железным дорогам.

Одной из существенных особенностей холоднокатаной стали является анизотропия ее магнитных свойств, т. е. различие этих свойств в различных направлениях внутри листа или пластины стали. Наилучшие магнитные свойства (наименьшие удельные потери и наибольшую магнитную проницаемость) эта сталь имеет в направлении прокатки. Магнитные свойства существенно ухудшаются, если вектор индукции магнитного поля направлен под углом, отличающимся от 0° , к направлению прокатки, и становятся наихудшими при угле, равном 55° .

Конструкция магнитной системы трансформатора с учетом анизотропии магнитных свойств холоднокатаной стали должна быть выполнена так, чтобы во всех ее частях — стержнях и ярмах вектор индукции магнитного поля имел направление, совпадающее с направлением прокатки стали. Эта задача не может быть решена полностью при использовании листовой стали с ограниченными размерами листов. Только поставка основной массы холоднокатаной стали в рулонах с развернутой длиной полосы от 1000 до 2000 м позволяет создавать магнитные системы, отвечающие этому требованию.

Применение рулонной стали позволяет коренным образом изменить технологию заготовки пластин магнитной системы с значительным уменьшением затраты ручного труда на эти операции. Отдельные части магнитной системы могут изготавливаться из рулонной стали путем навивки из ленты. Применение рулонной стали позволяет также уменьшить отходы стали при резке пластин до 4—5% по сравнению с отходами листовой стали, составляющими 15—20%.

Магнитные свойства холоднокатаной стали существенно ухудшаются при различных механических воздействиях: при резке стали на пластины, снятии с них заусенцев, изгибах пластин, случайных ударах при транспортировке, легких ударах при сборке магнитной системы и т. д. Особенно сильное ухудшение магнитных свойств происходит при навивке частей магнитной системы из ленты. Ухудшение магнитных свойств при этих воздействиях может быть снято восстановительным отжигом при температуре 800°C , проводимым до начала сборки магнитной системы, а для навитых частей — после навивки. Механические воздействия, возникающие после начала сборки, должны быть ограничены путем

соответствующей организации транспортировки пластин, осторожного обращения с ними при сборке магнитной системы и т. д.

Несмотря на указанные недостатки холоднокатаной стали и ее относительно высокую цену, трансформаторы с рационально спроектированной магнитной системой из этой стали при надлежащей технологии ее изготовления имеют относительно малые потери и ток холостого хода, дают экономию в расходе активных и других материалов и являются экономичными в эксплуатации. Поэтому все вновь проектируемые в СССР серии трансформаторов разрабатываются на основе применения холоднокатаной стали лучших марок с толщиной 0,35 мм. В дальнейшем предполагается выпуск новых марок холоднокатаной стали с уменьшенными удельными потерями и повышенной магнитной проницаемостью с толщиной 0,28—0,30 мм.

Второй из двух активных материалов трансформатора — металл обмоток в течение долгого времени не подвергался изменению. Низкое удельное электрическое сопротивление, легкость обработки (намотки, пайки), удовлетворительная стойкость по отношению к коррозии и достаточная механическая прочность электролитической меди сделали ее единственным материалом для обмоток трансформаторов в течение ряда десятилетий. Попытки применить для этой же цели алюминий, обладающий значительно меньшей плотностью, но большим (примерно в 1,6 раза) удельным электрическим сопротивлением и меньшей механической прочностью, легко наматываемый, но трудно поддающийся пайке, не имели успеха вследствие того, что предпринимались главным образом на базе простой замены медной обмотки алюминиевой с сохранением всех размеров и других данных магнитной системы и обмоток трансформатора. Такая замена является нецелесообразной потому, что при сохранении номинального тока и мощности трансформатора потери короткого замыкания увеличиваются пропорционально отношению удельных электрических сопротивлений алюминия и меди, т. е. в 1,6 раза.

Для сохранения потерь короткого замыкания токи обмоток, а следовательно, и мощность трансформатора должны быть снижены в $\sqrt{1,6}$, т. е. примерно в 1,27 раза, а его к. п. д. для прежних потерь, отнесенных к новой пониженной мощности, уменьшится на 0,4—0,5%.

**Основные физические свойства обмоточных проводов
из меди и алюминия**

Металл	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м		Плотность, кг/м³	Предел прочности на разрыв, МПа	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C)
	при температуре 20° C	при температуре 75° C			
Медь электролитическая	0,01724	0,02135	8900	240	390
Алюминий	0,0280	0,0344	2700	80—90	816

При этом напряжение короткого замыкания, отнесенное к новой мощности, уменьшается примерно на 20%, ток короткого замыкания, отнесенный к новому пониженному номинальному току, увеличивается примерно на 25%, а в абсолютном значении остается прежним. Механические силы при коротком замыкании остаются прежними, а механическая прочность провода обмоток вследствие замены меди алюминием понижается примерно в 2,5 раза. Масса металла обмоток и обмоточного провода уменьшается примерно в 3,3 раза и почти в таком же отношении уменьшается стоимость провода.

Основные физические свойства меди и алюминия приведены в табл. 1-9. Цена 1 кг обмоточного алюминиевого провода марки АПБ на 10—20% ниже цены медного провода марки ПБ.

Рационально спроектированные трансформаторы с алюминиевыми обмотками существенно отличаются по соотношению основных размеров от эквивалентных им по мощности и параметрам короткого замыкания и холостого хода трансформаторов с медными обмотками. Отличительными особенностями магнитной системы трансформатора с алюминиевыми обмотками являются при этом меньший диаметр, большие высота стержня и площадь окна магнитной системы. Алюминиевые обмотки имеют несколько большее число витков.

Увеличение чисел витков и сечений витков алюминиевых обмоток по сравнению с эквивалентными медными обмотками приводит к увеличению стоимости работы по намотке обмоток и к значительному увеличению расхода некоторых изоляционных материалов — бумажно-бакелитовых цилиндров (примерно на 30—25%), электрокартона и пропиточного лака (примерно 50—60%). При большей высоте магнитной системы увеличивается также высота бака и масса масла. Увеличение стоимости работы и стоимости этих материалов компенсируется уменьшением массы и стоимости провода обмоток так, что общая стоимость рационально спроектированного трансформатора с алюминиевыми обмотками практически не отличается от стоимости эквивалентного трансформатора с медными обмотками.

При переходе на алюминиевые обмотки был решен также ряд задач технологического характера, связанных с технологией намотки алюминиевых обмоток и с пайкой и сваркой алюминия. В настоящее время все новые серии трансформаторов общего назначения мощностью до 16 000 кВ·А включительно проектируются с алюминиевыми обмотками.

В большинстве масляных трансформаторов применяется обмоточный провод марки ПБ (АПБ для алюминия) с изоляцией из кабельной бумаги класса нагревостойкости А (предельно допустимая температура $+105^{\circ}\text{C}$) с общей толщиной 0,45—0,50 мм на две стороны. Применение провода более высоких классов нагревостойкости (Е, В, F и т. д.), допускающих более высокие предельные температуры, в масляных трансформаторах смысла не имеет потому, что допустимая температура обмоток определяется не только классом изоляции обмоток, но также и допустимой температурой для масла, в котором находится обмотка.

Замена бумажной изоляции провода маслостойкой и достаточно прочной в механическом и электрическом отношении эмалированной изоляцией с меньшей толщиной слоя позволила бы сделать обмотку более компактной и уменьшить массу металла обмотки и стали магнитной системы. Расчеты показывают, что для трансформатора средней мощности с напряжением ВН до 35 кВ при проводе, изолированном бумагой толщиной 0,5 мм на две стороны, такая замена позволила бы уменьшить массу металла обмотки примерно на 0,5% и массу стали магнитной системы примерно на 0,75% на каждый 0,1 мм уменьшения толщины изоляции провода (на две стороны). При изменении толщины изоляции с 0,5 до 0,1 мм и сохранении сечения

провода экономия металла составила бы для обмоток около 2%, для магнитной системы 3% при соответствующем снижении потерь короткого замыкания и холостого хода. Для трансформаторов с напряжением 110 кВ, имеющих бумажную изоляцию провода толщиной около 1,4 мм на две стороны, снижение масс металла обмоток и магнитной системы при переходе на изоляцию 0,1 мм составило бы соответственно 3,5—4 и 4,5—5%. Вследствие того что эмалевая изоляция провода значительно дороже бумажной, переход с бумажной на эмалевую изоляцию хотя и дал бы некоторое уменьшение массы активных материалов, но привел бы к увеличению стоимости трансформатора.

Основным направлением прогресса в производстве изоляционных материалов в настоящее время является получение новых материалов с повышенными нагревостойкостью и механической прочностью. Существенных достижений в повышении электрической прочности изоляционных материалов, применяемых в масляных трансформаторах, не наблюдается.

Применение проводов с изоляцией повышенной нагревостойкости имеет смысл в сухих трансформаторах, где за счет повышения температуры обмоток возможно допустить более высокие плотности тока и получить компактную конструкцию трансформатора. Если при этом допускается существенное повышение эксплуатационной температуры обмоток, то потери короткого замыкания трансформатора неизбежно возрастают вследствие как увеличения плотности тока, так и повышения удельного сопротивления провода обмотки. Так, при температуре 225°C удельное сопротивление медного провода увеличивается настолько, что становится равным удельному сопротивлению алюминия при температуре 75°C.

1-4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАССЧИТАННОГО ТРАНСФОРМАТОРА

При проектировании отдельного трансформатора, входящего в уже известную серию, или при проектировании новой серии трансформаторов весьма существенной является правильная оценка всех рассматриваемых вариантов рассчитанного трансформатора и выбор оптимального варианта. Важнейшим критерием для определения оптимального варианта в настоящее время считается экономическая эффективность вновь спроектированного трансформатора по сравнению с существующим или одного из вариантов по сравнению с другими вари-

антами. При определении экономической эффективности трансформатора должны быть учтены как затраты, связанные с его изготовлением — заводская себестоимость или оптовая цена, так и затраты на эксплуатацию этого трансформатора в течение определенного промежутка времени его работы в сети. Из затрат на эксплуатацию наибольшее значение имеет стоимость потерь активной и реактивной энергии в трансформаторе потому, что эти затраты обычно различны для разных вариантов трансформатора, в то время как затраты на уход за маслом, содержание персонала подстанции и ряд других являются одинаковыми для всех вариантов каждого трансформатора.

При проектировании отдельного трансформатора, отвечающего в отношении номинальной мощности и напряжений обмоток, а также параметров холостого хода и короткого замыкания требованиям ГОСТ или технических условий на существующую серию, т. е. имеющего определенные потери холостого хода и короткого замыкания, а также требующего определенной реактивной мощности, экономическая оценка может быть произведена путем простого сравнения себестоимости или цен рассчитанного и существующего трансформаторов. Более экономичным будет трансформатор с меньшей себестоимостью или ценой.

Если рассчитанный трансформатор отличается по параметрам холостого хода и короткого замыкания от серийного или ведется проектирование нескольких вариантов с различными параметрами, например при проектировании серии, то приходится сравнивать трансформаторы, неравноценные в эксплуатационном отношении. В этом случае добиваются получения не наиболее дешевого трансформатора, а наиболее дешевой трансформации, т. е. трансформатора, у которого первоначальные капитальные вложения в трансформаторную установку в сумме с текущими затратами на эксплуатацию этой установки за определенный промежуток времени будут минимальными.

Немаловажное значение при выборе оптимального варианта имеет также обеспечение возможно большей надежности и ремонтоспособности трансформатора. Оценка этих качеств может быть произведена после разработки конструкции и технологии изготовления трансформатора.

Экономическая оценка вновь спроектированных трансформаторов может производиться на разных стадиях проектирования — на предварительном проектировании новой серии, когда рассматривается большое число различных вариантов и выбирается один из них для детального расчета, на стадии детального расчета одного трансформатора до разработки конструкции, после предварительной и после окончательной разработки конструкции. На каждой из этих стадий проектирования может быть использована та или иная наиболее подходящая для данного случая методика определения экономической эффективности.

Одним из элементов экономической оценки является определение себестоимости или цены трансформатора. Наиболее точным можно считать определение себестоимости и цены, проводимое после окончательной разработки конструкции и технологии изготовления трансформатора на основе использования полной калькуляции с учетом всех реальных затрат на освоение и развитие его производства. На более ранних стадиях проектирования приходится использовать приближенные методики, позволяющие произвести оценку себестоимости и цены трансформатора на основании учета расхода основных (или только активных) материалов с ориентировочным определением других расходов. Ниже рекомендуются и описываются некоторые приближенные методики, применяемые на разных стадиях проектирования.

При проектировании отдельного трансформатора или новой серии трансформаторов обычно возникает необходимость в экономическом сравнении различных вариантов этого проекта или сравнении одного или нескольких вариантов этого проекта с существующим или ранее спроектированным трансформатором. При таком сравнении следует себестоимость или цену для всех сравниваемых вариантов рассчитывать по одной и той же методике. Недопустимо, например, для одного варианта или трансформатора определять цену приближенным методом, а для другого находить ее по прейскуранту.

Одним из методов выбора варианта решения, оптимального в экономическом отношении, является метод срока окупаемости, который заключается в сопоставлении разности капитальных вложений двух вариантов K_2 и K_1 с экономией на ежегодных издержках I_1 — I_2 .

Сроком окупаемости T называется следующее выражение (если $K_2 > K_1$ и $I_2 < I_1$):

$$T = \frac{K_2 - K_1}{I_1 - I_2}. \quad (1-1)$$

Вариант 2 с большими капитальными вложениями считается экономически выгодным, если дополнительные капитальные вложения $K_2 - K_1$ окупаются экономией на ежегодных издержках $I_1 - I_2$ в течение срока меньше, чем нормативный срок окупаемости, принимаемый в настоящее время для силовых трансформаторов общего назначения $T_{\text{н}} = 8,33$ лет; т. е. если $T \leq T_{\text{н}}$.

Более удобным для расчетов является определение и сравнение не сроков окупаемости, а приведенных годовых затрат 3.

Приведенными затратами 3, отнесенными к одному году, называются выражения типа $K_1 E_{\text{н}} + I_1$; $K_2 E_{\text{н}} + I_2$ и т. д., рассчитанные для каждого варианта. При этом $E_{\text{н}} = 1/T_{\text{н}}$, т. е. $E_{\text{н}} = 1/8,33 = 0,12$ называется нормативным коэффициентом эффективности капитальных вложений. Наиболее экономически выгодным будет вариант с наименьшим значением 3.

Приведенные годовые затраты на трансформаторную установку могут быть подсчитаны по формуле

$$3 = E_{\text{н}} K_{\text{тр}} + 3_{\text{а}} + 3_{\text{х}} P_{\text{х}} + 3_{\text{к}} P_{\text{к}} + 3_{\text{р}} Q_{\text{р}}; \quad (1-2)$$

здесь $K_{\text{тр}}$ — себестоимость или оптовая цена трансформатора, руб.;

$3_{\text{а}}$ — затраты на амортизационные годовые отчисления, руб/год;

$3_{\text{х}}$ и $3_{\text{к}}$ — годовые затраты, руб/(кВт·год), связанные с покрытием не зависящих от нагрузки потерь холостого хода ($P_{\text{х}}$, кВт) и изменяющихся с нагрузкой потерь короткого замыкания ($P_{\text{к}}$, кВт);

$3_{\text{р}}$ — годовые затраты, руб/(квар·год), на компенсацию реактивной мощности ($Q_{\text{р}}$) трансформатора; $3_{\text{р}}$ может быть принято по табл. 1-10;

$Q_{\text{р}}$ — реактивная мощность, определяется как сумма реактивных мощностей холостого хода и короткого замыкания, квар:

$$Q_{\text{р}} = \frac{S}{100} (i_{0\text{р}} + u_{\text{р}}) \approx \frac{S}{100} (i_0 + u_{\text{к}}), \quad (1-3)$$

где S — номинальная мощность трансформатора, кВ·А.

В выражении (1-2) $З_{тр} + З_a$ может быть заменено формулой

$$E_n K_{тр} + З_a = K_{тр} (E_n + U_a), \quad (1-4)$$

где $K_{тр}$ — себестоимость или оптовая цена трансформатора, руб.;

$E_n = 0,12$ — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

$U_a = 0,064$ — нормативные амортизационные годовые отчисления.

Таким образом,

$$E_n K_{тр} + З_a = 0,184 K_{тр}. \quad (1-5)$$

Себестоимость или оптовая цена трансформатора $K_{тр}$ может быть определена одним из методов, описанных при дальнейшем изложении этого параграфа. Во избежание существенных ошибок необходимо при сравнении двух и более различных вариантов пользоваться для определения $K_{тр}$ одним и тем же методом для всех вариантов.

Метод приведенных годовых затрат является наиболее удобным и достаточно точным для оценки экономической эффективности при предварительном расчете новых серий трансформаторов, когда еще до детального расчета проектируемых трансформаторов необходимо выбрать наиболее экономичный вариант на основе сравнения стоимости активных материалов и стоимости потерь энергии в трансформаторе, отнесенных к определенному промежутку времени, для различных вариантов расчета.

При сравнении различных вариантов могут не подсчитываться и не включаться в расчет капитальные затраты или годовые издержки, заведомо одинаковые или мало различающиеся для всех сравниваемых вариантов. Поэтому в формуле для расчета затрат не учтены затраты на транспортировку трансформатора к месту установки, установку, монтаж и некоторые другие. Для сухих трансформаторов можно ограничиться расчетом стоимости активной части — остова с обмотками, не включая стоимости защитного кожуха и других деталей, и для всех трансформаторов масляных и сухих следует вклю-

чать в годовые издержки только стоимость потерь активной и реактивной энергии, не учитывая других эксплуатационных расходов, остающихся одинаковыми для всех рассматриваемых вариантов.

Определение удельных годовых затрат на покрытие 1 кВт годовых потерь холостого хода и короткого замыкания Z_x и Z_k производится по себестоимости электрической энергии в энергосистеме с учетом необходимых капиталовложений в электростанции и сети, добычу и транспорт топлива. При определении Z_x и Z_k должны также учитываться: место трансформатора в сети — число ступеней трансформации напряжения от станции до трансформатора и потери на этих ступенях; число часов включения трансформатора в сеть в течение года T_v ; приведенное число часов потерь в год $T_{\text{п}}$, зависящее от места установки трансформатора, его назначения и характера графика нагрузки, и коэффициент, учитывающий попадание переменных потерь в максимум нагрузки системы, а также степень нарастания нагрузки по годам.

При определении годовых затрат Z по формуле (1-2) можно пользоваться табл. 1-10, где для трансформаторов разных мощностей, разных классов напряжения и различного назначения приведены рассчитанные по методике проф. П. Г. Грудинского значения Z_x и Z_k с учетом числа часов включения T_v для постоянных потерь (P_x) и часов потерь $T_{\text{п}}$ для переменных потерь (P_k).

Потери холостого хода P_x (кВт), короткого замыкания P_k (кВт) подставляются в формулу затрат из проекта трансформатора.

После определения затрат для всех сравниваемых вариантов полученные значения Z сравниваются. Наиболее экономичным считается вариант с наименьшими годовыми затратами. При расчете отдельного трансформатора и при проектировании новой серии для каждого варианта расчета необходимо определять себестоимость или оптовую цену трансформатора. При этом в различных случаях приходится пользоваться разными более точными или в той или иной степени приближенными методами расчета себестоимости и цены.

В условиях завода себестоимость трансформатора определяется после выполнения рабочих чертежей и разработки технологии его изготовления путем точной калькуляции всех прямых и косвенных затрат (на материалы,

Удельные годовые затраты Z_k , Z_k и Z_p , руб/(кВт·год), для расчета по формуле (1-2)

Группы трансформаторов	Мощность, кВт·А	Класс напряжения, кВ	Годовое время, ч			Z_k , руб/(кВт·ч год)	Z_k , руб/(кВт·ч год)	Z_p , руб/(квар·ч год)
			включения	максимальных потерь	номинальных потерь			
Понижающие трансформаторы распределительных сетей	До 630	6—35	8000	1200	590	102	12,4	2,9
Понижающие трансформаторы распределительных сетей	1000 и более	6—35	8200	5500	2700	96	33,0	2,9
Понижающие трансформаторы	Всех мощностей	110—220	8500	4100	2000	96	26,7	1,6
Понижающие автотрансформаторы связи на электростанциях	То же	220 и выше	8700	4100	1800	91	23,0	1,0
Повышающие трансформаторы и автотрансформаторы электростанций	»	35 и выше	8000	5000	4500	85	55,6	—
Трансформаторы собственных нужд электростанций	»	Всех напряжений	8000	5000	4000	85	49,5	—

заработную плату, различные отчисления) и всех других расходов. Такие калькуляции служат обычно основанием для расчета и утверждения цены трансформатора.

Заводская калькуляция себестоимости трансформатора выполняется на основании рабочих чертежей, спецификаций на материалы и полуфабрикаты, технологической документации и существующих нормативов на затраты материалов, топлива, энергии и труда на изготовление данного вида продукции.

При определении стоимости материалов трансформатора учитываются все материалы и полуфабрикаты, затрачиваемые на изготовление всех его узлов и деталей, а также готовые узлы или устройства (например, переключатели, вводы, защитные реле и т. д.), если эти узлы и устройства получают в комплектном виде с других предприятий. Фактический расход какого-либо материала определяется как сумма чистых масс всех деталей, изготовленных из этого материала и массы отходов, нормированной для каждого материала применительно к действующей на заводе технологии. Если какая-либо часть отходов материала реализуется затем на стороне, например сдастся в виде лома, то из общей стоимости материалов исключается сумма, полученная при такой реализации.

Стоимость всех материалов рассчитывается на основе оптовых цен, которые определяются по официально утвержденным прейскурантам с учетом расходов на тару, упаковку и транспортировку материалов на завод.

Расходы на заработную плату производственным рабочим определяются для изготовления каждой детали и для каждой операции технологического процесса сборки, сушки, пропитки, окраски и т. д. по действующим на заводе нормам и расценкам и затем суммируются по цехам и по всему заводу.

Косвенные затраты можно подразделить на расходы по содержанию и эксплуатации оборудования, на цеховые и общезаводские расходы. К цеховым относятся расходы на содержание аппарата управления цеха, на оплату освещения и отопления цеха, на амортизацию зданий и некоторые другие.

Общезаводские расходы включают оплату общезаводского аппарата управления, подготовки производства, содержания и отопления зданий, связи, охраны и т. д. В заводской калькуляции цеховые и общезаводские расходы, а также расходы по содержанию и эксплуатации оборудования обычно учитываются определенным процентом по отношению к заработной плате производственных рабочих. Для получения полной себестоимости трансформатора к перечисленным выше расходам добавляются некоторые внепроизводственные расходы (обычно до 1% их общей суммы) и для перехода к оптовой цене — накопления — для силовых трансформаторов общего назначения 11%.

При учебном проектировании рабочие чертежи узлов и деталей трансформатора обычно не разрабатываются, количество и стоимость затрачиваемых материалов могут быть рассчитаны с некоторым приближением, а затраты на заработную плату производственных рабочих и другие расходы могут быть определены лишь по аналогии с соответствующими расходами одного из транс-

форматорных заводов. В этом случае себестоимость или оптовая цена трансформатора может быть определена на основании упрощенной калькуляции с учетом действительного расхода основной массы материалов и приближенного расчета производственной заработной платы и других расходов.

При учебном проектировании расчет ориентировочной цены трансформатора производится по сумме стоимостей основных материалов с приближенным определением расхода прочих материалов, производственной заработной платы, цеховых и общезаводских расходов и других начислений. Расчет количества всех материалов ведется по расчетной записке и чертежам проекта: чертежам основания и установки обмоток, сборочному чертежу трансформатора.

К основным материалам масляного трансформатора, стоимость которых определяется при учебном проектировании, относятся следующие материалы:

остов — сталь электротехническая с учетом стоимости лакировки и отжига, металл ярмовых балок, прессующих колец, стяжных шпилек ярма и остова и подъемных шпилек; дерево или электрокартон уравнивающей изоляции;

обмотки — обмоточный провод; бакелитовые или картонные цилиндры; весь электрокартон — рейки, междувитковые и междукатушечные прокладки, шайбы, ярмовая изоляция, опорные кольца и др.; пропиточный лак;

отводы — металл или провод отводов; дерево крепления отводов; бак и расширитель — металл стенок, дна и крышки бака; металл стенки и дна расширителя; охлаждающие трубы (без труб радиаторов); тележка (без катков); верхняя рама бака; ребра жесткости; трансформаторное масло.

Кроме стоимости основных материалов, при учебном проектировании следует также подсчитать стоимость комплектующих изделий и готовых узлов — радиаторов, кранов радиаторных, кранов для заливки и слива масла, комплектных вводов, переключателей ответвлений обмоток, приводов к переключателям, термометров, термосигнализаторов, газовых реле, предохранителей от перенапряжения. Для комплектующих изделий и готовых узлов следует принимать цены, по которым их отпускают потребителям трансформаторные заводы в качестве запасных частей.

При расчете трансформаторов с естественным воздушным охлаждением номенклатура основных материалов остается принципиально той же, но металл бака и его частей заменяется металлом кожуха, а также отпа-

дает ряд комплектующих изделий, предназначенных для ухода за маслом и защиты масляных трансформаторов (расширитель, краны, газовые реле, термометры и др.).

При расчете стоимости основных материалов трансформаторов, имеющих токоограничивающие или другие реакторы, учитывается также и стоимость основных материалов остова и обмоток реактора.

В учебном проекте не подсчитывается стоимость прочих материалов, не отнесенных к основным, а именно крепежных деталей — мелких болтов и шпилек, гаек, шайб; различных мелких деталей — пробок, подъемных крюков и колец, катков и т. д.; некоторых изоляционных материалов — кабельной и других бумаг, лакоткани, киперной и другой ленты, изоляционных трубок; уплотнений; эмали для окраски бака и т. д. Стоимость этих материалов оценивается примерно как 5% стоимости основных.

Фактический расход или заготовительная масса основных материалов рассчитывается как чистая масса соответствующих деталей с последующим умножением на коэффициент, учитывающий нормативные отходы данного материала $K_{отх}$ ($K_{отх} > 1,0$).

Стоимость каждого материала определяется как произведение заготовительной массы на оптовую цену этого материала, которая может быть найдена по официальным прейскурантам. Поскольку оптовые цены на большинство материалов установлены в прейскурантах «франко-вагон станция отправления» (местонахождение завода-изготовителя) и не включают стоимость перевозки от железнодорожной станции завода-изготовителя до завода-получателя, а в ряде случаев не включают и стоимость тары, то к общей стоимости материалов прибавляются заготовительные расходы, которые могут быть оценены примерно в 4% полной стоимости материалов.

Расход производственной заработной платы на изготовление трансформатора зависит от степени сложности конструкции, от того, выпускается ли данный тип трансформатора большими партиями или отдельными единицами, является ли он новым типом или освоенным и от других причин. Анализ калькуляций показывает, что все силовые трансформаторы могут быть подразделены на небольшое число групп, для которых расход производственной заработной платы может быть приближенно найден как определенная часть стоимости материалов.

Обозначая отношение суммы производственной заработной платы к стоимости основных материалов через коэффициент K , можно принимать этот коэффициент для трансформаторов различных типов по табл. 1-11.

Цеховые и общезаводские расходы и расходы на содержание и эксплуатацию оборудования начисляются обычно определенным процентом по отношению к заработной плате производственных рабочих и являются различными для разных заводов. Для трансформаторного производства эти расходы в среднем для нескольких заводов могут быть приняты: цеховые 100%, общезаводские 100% и расходы на содержание и эксплуатацию оборудования 150% производственной заработной платы.

Можно рекомендовать следующий порядок приближенного определения расчетной цены трансформатора:

по расчетной записке и чертежам проекта подсчитывается стоимость основных материалов $C_{осн}$ и учитывается стоимость прочих материалов $C_{пр} \approx 0,05 C_{осн}$;

учитываются заготовительные расходы (упаковка, транспорт и др.) $C_{заг} \approx 0,04 C_{осн}$;

определяется стоимость всех материалов для завода $C_{м} \approx 1,09 C_{осн}$;

подсчитывается стоимость всех комплектующих изделий и готовых узлов $C_{компл}$;

приближенно определяется стоимость трудовых затрат $C_{тр}$; $K C_{м}$;

приближенно определяется заводская себестоимость трансформатора $C \approx (1 + 4,5K) C_{м} + C_{компл}$;

определяется условная оптовая цена трансформатора

$$Ц = 1,01 \cdot 1,11 C, \quad (1-6)$$

где 1,01 — коэффициент, учитывающий внепроизводственные расходы;

1,11 — коэффициент, учитывающий нормативные накопления для силовых трансформаторов общего назначения.

Стоимость реализуемых отходов при производстве силовых трансформаторов (стальной лом) обычно составляет не более 0,25—0,3% стоимости всех материалов и в приближенном расчете может не учитываться.

При проектировании новой серии трансформаторов приходится сравнивать большое число вариантов расчета каждого типа трансформатора. Для ускорения этой работы предварительный расчет всех вариантов обычно

Коэффициенты для приближенного расчета стоимости трансформатора и активной части по формулам (1-6) и (1-7)

Вид охлаждения	Способ регулирования	Класс напряжения, кВ	Мощность, кВ·А	K	K ₀ , формула (1-7)		K _{ст} , формула (1-7)	
					медные обмотки	алюминиевые обмотки	ЭЗ30, 0,408 руб/кг	ЭЗ30А, 0,456 руб/кг
Масляное	ПВВ	10	25—630	0,08	1,35	1,55	1,79	1,72
»	ПВВ	35	160—630	0,16	1,55	1,95	1,79	1,72
»	ПВВ	10 и 35	1000—16 000	0,16—0,12	1,50	1,90	1,60	1,56
»	РПН	35	1000—16 000	0,16	1,70—1,50	2,2—2,0	1,60	1,56
»	РПН	110	6300—16 000	0,12—0,10	1,70—1,50	2,2—2,0	1,60	1,56
»	РПН	110 и 35	25 000—63 000	0,07	1,90—1,75	—	1,60	1,56
Воздушное, класс изоляции Е	ПВВ	10	160—1600	0,10	2,0	3,0	1,60	1,56
Воздушное, класс изоляции В	ПВВ	10	160—1600	0,10	3,0—2,8	4,9—4,3	1,60	1,56

Примечание. K — отношение суммы производственной заработной платы к общей стоимости основных материалов.

ведется по одному из существующих методов приближенного расчета, дающему возможность определить параметры холостого хода и короткого замыкания, а также массы активных материалов трансформаторов. Именно на этом этапе проектирования необходимо произвести экономическое сравнение различных вариантов и выбрать для дальнейшей более полной разработки те из них, которые являются наиболее экономичными. Таким же образом может производиться выбор оптимального варианта при расчете отдельного трансформатора, если для него не заданы потери холостого хода и короткого замыкания.

Поскольку на стадии предварительного расчета определяются массы только активных материалов и основные размеры трансформатора, а массы других материалов (изоляция, металла бака и крепления остова, масла, дерева и т. д.) остаются еще неизвестными, в этом случае не может быть применена даже упрощенная калькуляция себестоимости или цены трансформатора на основании учета реальных затрат материалов и заработной платы и должен быть применен другой метод приближенного расчета этих величин.

При расчете стоимости трансформатора с целью экономического сравнения ряда рассчитанных вариантов, как уже было сказано ранее, достаточно учесть стоимость лишь тех его частей и узлов, размеры, количество и стоимость которых могут изменяться от одного варианта к другому. В масляном и сухом трансформаторах, как правило, при расчете различных вариантов изменяются размеры и масса магнитной системы и обмоток вместе с массой изоляции обмоток. Если в масляном трансформаторе при этом изменяются потери, то должна также изменяться и стоимость системы охлаждения. Ряд деталей и узлов масляного трансформатора — отводы, вводы, переключатели, расширитель, арматура, крепежные детали, кожух в сухом трансформаторе и т. д., остаются неизменными при переходе от одного варианта к другому и могут не учитываться при расчете стоимости.

Стоимость (цена) активной части трансформатора, т. е. остова с обмотками для масляного и сухого трансформаторов, может быть рассчитана по формуле

$$C_{a.ч} \approx K_0 c_0 G_{пр} + K_{ст} K_{отх} c_{ст} G_{ст}, \quad (1-7)$$

где K_0 — коэффициент, учитывающий стоимость изоля-

ционных материалов (электрокартон, бумажно-бакелитовые цилиндры, пропиточный лак и т. д.), стоимость изготовления обмотки, цеховые и общезаводские расходы, расходы на содержание и эксплуатацию оборудования, внепроизводственные расходы и плановые накопления. Значения этого коэффициента для трансформаторов различных типов могут быть ориентировочно приняты по табл. 1-11. Средняя цена обмоточного провода для обмоток ВН, СН и НН c_0 может быть принята: для трансформаторов мощностью 25—630 кВ·А классов напряжения 10 и 35 кВ для меди $c_M = 1,00$ руб/кг, для алюминия $c_A = 0,88$ руб/кг; для трансформаторов мощностью 1000—63 000 кВ·А для меди $c_M = 0,97$ руб/кг, для алюминия $c_A = 0,83$ руб/кг (провод марок ПБ и АПБ).

Для сухих трансформаторов мощностью 160—1600 кВ·А класса напряжения 10 кВ с обмотками из провода марок ПБ и АПБ можно принять цену провода такую же, как и для масляных трансформаторов соответствующих мощностей, а при обмотках из провода марок ПСД и АПСД — для меди $c_M = 1,2 \div 1,15$ руб/кг и для алюминия $c_A = 1,5 \div 1,3$ руб/кг. В тех случаях, когда известно не только количество, но и размеры сечения провода, следует принимать c_0 по прейскуранту для данной марки и сечения провода; $G_{пр}$ — масса провода обмотки; $K_{ст}$ — коэффициент, учитывающий стоимость изготовления остова трансформатора, включая стоимость крепежных и других материалов, заработную плату, начисления и нормативные накопления. Значения этого коэффициента для трансформаторов различных типов могут быть ориентировочно приняты по табл. 1-11 в зависимости от марки стали и ее цены.

Коэффициенты $K_{ст}$ и K_0 , приведенные в табл. 1-11, определены для плоских магнитных систем и обмоток из медного и алюминиевого провода круглого (обмотки ВН трансформаторов 25—630 кВ·А) и прямоугольного сечения (все остальные обмотки). Для пространственных магнитных систем и обмоток из алюминиевой фольги эти коэффициенты требуют дополнительного уточнения;

$K_{отх}$ — коэффициент, учитывающий отходы стали при раскroe, может быть принят, равным 1,25 для листовой и 1,05—1,06 для рулонной стали;

$c_{ст}$ — цена стали (руб/кг) по прейскуранту или по табл. 1-11;

$G_{ст}$ — масса стали по расчету.

Стоимость (цена) системы охлаждения — бака с трубами для трансформаторов мощностью до 1600 кВ·А или бака с навесными трубчатыми радиаторами для трансформаторов мощностью 2500—80 000 кВ·А (от 10 000 кВ·А и выше — с дутьем) изменяется вместе с изменением суммы потерь $P_x + P_k$. Удельная стоимость системы охлаждения, отнесенная к 1 кВт потерь $K_{охл}$ (руб/кВт), может быть найдена из табл. 1-12. Тогда стоимость системы охлаждения трансформатора, руб.,

$$C_{охл} = K_{охл} (P_x + P_k). \quad (1-8)$$

Стоимость (цена) трансформатора $K_{тр}$ в формуле (1-5) для экономического сравнения вариантов расчета может быть найдена из

$$K_{тр} = C_{а.ч} + C_{охл}, \quad (1-9)$$

или

$$K_{тр} = K_o c_o G_{пр} + K_{ст} K_{отх} c_{ст} G_{ст} + K_{охл} (P_x + P_k). \quad (1-10)$$

Найденное значение $K_{тр}$ может быть подставлено в выражение (1-4) или (1-5) для экономического сравнения вариантов, но оно не равнозначно условной оптовой цене трансформатора, определяемой по выражению (1-6), поскольку не включает стоимость ряда узлов и некоторых материалов, стоимость которых не изменяется

Таблица 1-12

Стоимость системы охлаждения, отнесенная к 1 кВт потерь $K_{охл}$ (руб/кВт), для превышений температуры верхних слоев масла 55 и 50°C

Трансформаторы мощностью, кВ·А	Тип бака	Без дутья		С дутьем	
		55°C	50°C	55°C	50°C
25—1600	С трубами или приваренными ра- диаторами	16,5	20,0	—	—
2500—6300	С трубчатыми навесными радиа- торами	15,4	18,4	—	—
10 000— 80 000	То же	16,2	19,3	12,2	14,5

при переходе от одного варианта к другому (проходные изоляторы, переключающие устройства, арматура бака, крепежные материалы и др.). Условная оптовая цена трансформатора C из (1-6) также может быть использована при расчете по (1-5) и (1-4), однако при экономическом сравнении несколько вариантов для всех вариантов стоимости $K_{тр}$ должны быть рассчитаны по одному методу.

Анализ ряда калькуляций трансформаторов позволяет определить также некоторые приближенные соотношения отдельных составляющих цены.

Для различных серий трансформаторов отношение цены трансформатора к цене его активной части является достаточно стабильным. Так, это отношение можно принять равным:

1,45 для масляных трансформаторов ПБВ мощностью 25—630 кВ·А класса напряжения 10 кВ, 1,75 для класса напряжения 35 кВ и 1,8—1,6 для мощностей 1000—16 000 кВ·А 10 и 35 кВ;

2,10 для масляных трансформаторов РПН мощностью 1000—4000 кВ·А классов напряжения 35 и 110 кВ и 1,9 для мощностей 6300—63 000 кВ·А 35 и 110 кВ;

1,25 для сухих трансформаторов мощностью 160—1600 кВ·А класса напряжения 10 кВ и класса нагревостойкости изоляции В.

В табл. 1-13 приведены практические значения отношения стоимости (цены) обмоток и остова к стоимости (цене) активной части и всего трансформатора. Стоимость масла в цене масляного трансформатора для трансформаторов мощностью 25—630 кВ·А классов напряжения 10 и 35 кВ составляет от 12 до 14% и для трансформаторов 1000—63 000 кВ·А классов напряжения 35 и 110 кВ — от 6,5 до 9%. При расчете вышеприведенных отношений для трансформаторов РПН из стоимости (цены) трансформатора исключалась стоимость (цена) устройства регулирования напряжения.

После окончательной разработки конструкции и технологии изготовления спроектированного трансформатора может быть определен народнохозяйственный экономический эффект от внедрения этой разработки. При этом новый трансформатор сравнивается с таким же по классу напряжения и равным или близким по мощности существующим базисным трансформатором. При экономическом сравнении учитывается себестоимость вновь спроектированного трансформатора в соответствии с нормативами для второго года освоения его производ-

**Отношение стоимости (цены) обмоток и остова
трансформатора к стоимости (цене) активной части
и всего трансформатора**

Вид охлаждения	Мощность, кВ·А	Класс напряжения, кВ	Активная часть 100%		Трансформа- тор 100 %	
			Обмотки, %	Остов, %	Обмотки, %	Остов, %
Масляное	25—630 ПБВ	10	30—32	70—68	20—22	44—49
	25—630 ПБВ	35	34—39	66—61	19—23	37
	1000—16 000 ПБВ	10 и 35	28—32	72—68	17—18	37—44
	1000—16 000 РПН	35	34—37	66—63	18—19	31—36
	6300—16 000 РПН	110	36—40	64—60	19—20	28—30
	25 000—63 000 РПН	110	45—48	55—52	23—25	28—31
Воздушное, класс изоляции В	160—1600	10	72—60	28—40	65—50	21—34

ства. Должны быть также учтены дополнительные затраты, связанные с разработкой нового трансформатора и организацией его производства (исследовательские работы, разработка технологического процесса, дополнительные затраты на оборудование и т.д.). Окончательный экономический эффект оценивается путем сопоставления дополнительных расходов на производство нового трансформатора и экономии при его эксплуатации с соответствующими данными базисного трансформатора.

КОНСТРУКЦИИ ОСНОВНЫХ ЧАСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРА

2-1. ОБЩАЯ КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА ТРАНСФОРМАТОРА

В соответствии с ГОСТ 16110-70 трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, имеющее две или больше индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока. Трансформатор, предназначенный для преобразования электрической энергии в сетях энергосистем и потребителей электроэнергии, называется силовым. Если силовой трансформатор предназначен для включения в сеть, не отличающуюся особыми условиями работы, или для питания приемников электрической энергии, не отличающихся особыми условиями работы, характером нагрузки или режимом работы, то он называется силовым трансформатором общего назначения.

В конструктивном отношении современный силовой масляный трансформатор можно схематически представить состоящим из трех основных систем — магнитной системы, системы обмоток и системы охлаждения и вспомогательных систем — устройства регулирования напряжения, измерительных и защитных устройств, арматуры и других. В трансформаторах с воздушным охлаждением, как правило, отсутствуют измерительные и защитные устройства и арматура, а система охлаждения не выделяется в виде отдельных конструктивных единиц.

Конструктивной и механической основой трансформатора является его магнитная система (магнитопровод), служащая для локализации в ней основного магнитного поля трансформатора и представляющая собой комплект пластин или других элементов из электротехнической стали или другого ферромагнитного материала, собранных в определенной геометрической форме.

Большинство типов магнитных систем можно четко подразделить на отдельные части. В соответствии с этим делением в магнитной системе различают стержни — те ее части, на которых располагаются основные обмотки трансформатора, служащие непосредственно для преоб-

разования электрической энергии, и ярма — части, не несущие основных обмоток и служащие для замыкания магнитной цепи, а в некоторых типах трансформаторов также для расположения обмоток, имеющих вспомогательное назначение.

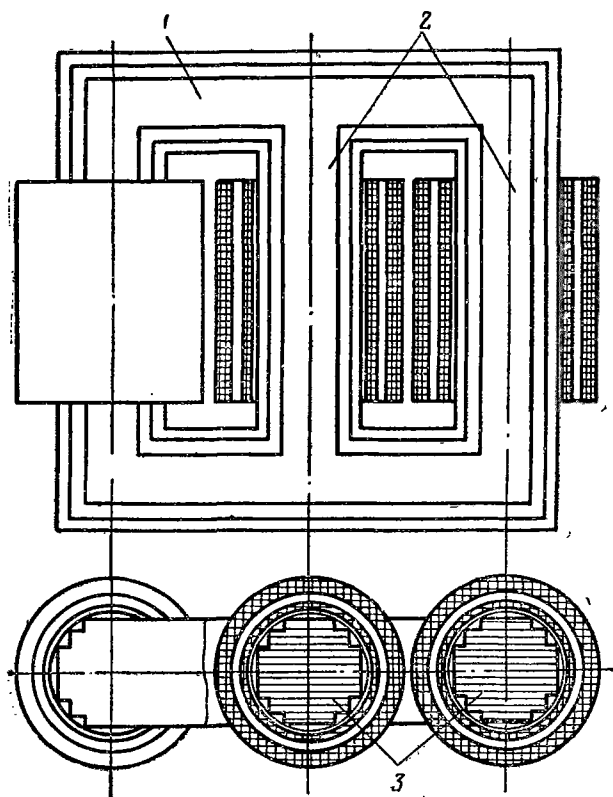


Рис. 2-1. Плоская стержневая шихтованная магнитная система трехфазного трансформатора с обмотками.

1 — ярмо; 2 — стержень; 3 — сечение стержня.

Некоторые магнитные системы, например системы тороидальной формы, намотанные в виде кольца из ленты или собранные из плоских круговых колец, отштампованных из тонколистовой стали, не подразделяются на стержни и ярма.

Практикой трансформаторостроения в течение десятилетий были выработаны различные схемы взаимного расположения отдельных частей магнитной системы. По этому признаку все магнитные системы разделяются на плоские — такие, в которых продольные оси всех стержней и ярм располагаются в одной плоскости (рис. 2-1), и пространственные, в которых оси стержней и ярм располагаются не в одной плоскости (рис. 2-2).

По взаимному расположению стержней и ярм плоские и пространственные магнитные системы могут также подразделяться на стержневые, броневые и бронестержневые. В течение ряда лет магнитные системы силовых трансформаторов выполнялись и в значительной части выполняются в настоящее время в виде плоских магнитных систем по типу рис. 2-1 путем сборки из плоских пластин электротехнической стали. В изображенной на рис. 2-1 магнитной системе трехфазного силового трансформатора ярма соединяют разные стержни и каждое ярмо располагается со стороны торцов стержней. Такая магнитная система с торцовыми ярмами называется стержневой.

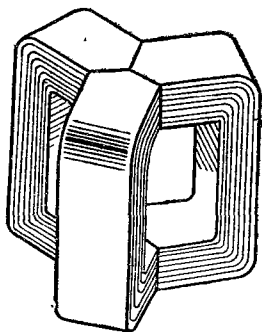


Рис. 2-2. Пространственная стержневая стыковая магнитная система трехфазного трансформатора, собираемая из навитых и разрезанных частей.

На рис. 2-3, а и б изображены магнитные системы, у которых каждый стержень имеет боковые ярма, соединяющие два разных конца этого стержня. У трансформаторов с такими магнитными системами боковые поверхности обмоток как бы закрыты броней, отчего магнитные системы этого типа при наличии не менее двух боковых ярм на каждом стержне получили название броневых.

На рис. 2-3, в показан промежуточный бронестержневой тип магнитной системы, у которой не все стержни имеют боковые ярма или каждый стержень имеет не более чем одно боковое ярмо.

Наибольшее распространение в практике трансформаторостроения получили плоские магнитные системы

стержневого типа со ступенчатой формой поперечного сечения стержня, вписанной в окружность и с обмотками в виде круговых цилиндров. Плоские бронестержневые системы и броневые системы по рис. 2-3, б, аналогичные по форме обмоток и сечения стержня системам стерж-

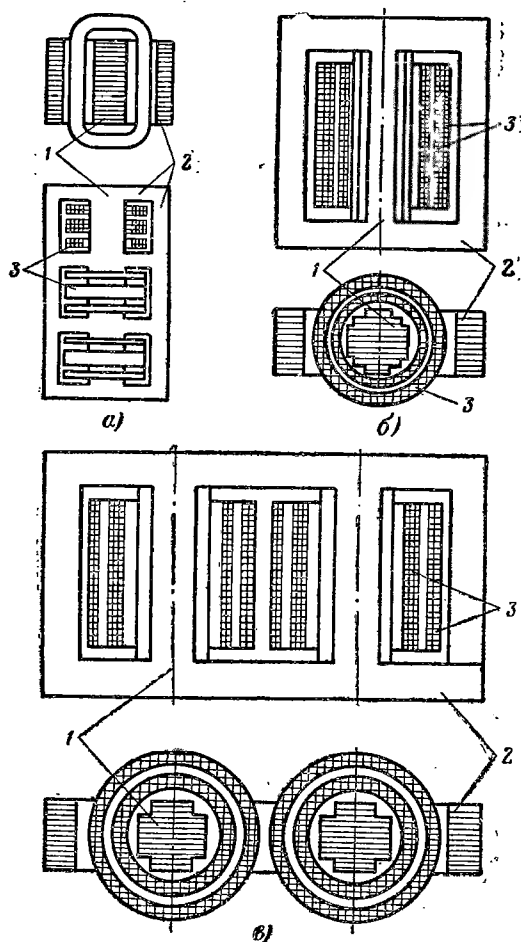


Рис. 2-3. Броневые (а, б) и бронестержневая (в) магнитные системы трехфазного (а) и однофазных (б, в) трансформаторов.

1 — стержень; 2 — ярмо; 3 — обмотки.

невых трансформаторов, требуют несколько большего расхода электротехнической стали и применяются в некоторых типах трансформаторов большой мощности (более 100 тыс. кВ·А), а также в некоторых трансформаторах малой мощности (1—3 кВ·А).

В последние годы в силовых трансформаторах мощностью до 6300 кВ·А находят все более широкое применение пространственные магнитные системы по рис. 2-7, а и б и других типов. Броневые магнитные системы по рис. 2-3, а при горизонтальном расположении стержней и ярм с обмотками прямоугольной формы применяются некоторыми иностранными фирмами для трансформаторов, предназначенных для питания электрических печей.

Магнитная система, в которой все стержни имеют одинаковую форму, конструкцию и размеры, а взаимное расположение любого стержня по отношению ко всем ярмам одинаково для всех стержней, называется симметричной (рис. 2-2, 2-3, б, в). При отсутствии одного из этих признаков магнитная система называется несимметричной. Так, трехфазная магнитная система, изображенная на рис. 2-1, несимметрична потому, что взаимное расположение ее среднего и крайних стержней по отношению к ярмам различно.

По способу сборки различают: шихтованные магнитные системы, ярма и стержни которых собираются впереплет из плоских пластин как единая цельная конструкция, навитые магнитные системы, отдельные части которых изготавливаются путем навивки из ленточной электротехнической стали, а затем скрепляются в единую конструкцию, и стыковые магнитные системы, ярма и стержни или отдельные части которых, собранные и скрепленные раздельно, при сборке системы устанавливаются встык и скрепляются специальными стяжными конструкциями или другими способами.

Часто применяемый порядок сборки шихтованной стержневой магнитной системы показан на рис. 2-4, а. Сборка ведется на горизонтальном стенде путем чередования слоя пластин (обычно толщиной в две пластины, редко в три-четыре), разложенных по положению 1, со слоем пластин, разложенных по положению 2. В результате сборки после стяжки ярм прессующими балками и стержней бандажами получается остов трансформатора, не требующий каких-либо добавочных креплений. На рис. 2-5 изображена магнитная система трансформатора мощностью 10 000 кВ·А класса напряжения 110 кВ в процессе сборки на специальном стенде. Порядок сборки, показанный на рис. 2-4, а и 2-5, является одним из наиболее простых, но не единственно возможным. Для насадки обмоток на стержни верхнее ярмо магнитной

системы, собранной впереплет, разбирается по отдельным пластинам, а после насадки обмоток снова собирается. Магнитные системы трансформаторов мощностью до 630 кВ·А включительно, не требующие стяжки стержней бандажами, могут собираться с укладкой пластин

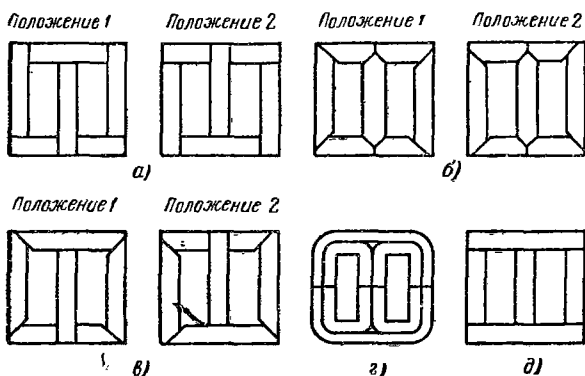


Рис. 2-4. Порядок сборки трехфазных магнитных систем.

а — шихтованной с прямыми стыками; *б* — то же с косыми стыками в шести углах; *в* — то же с косыми стыками в четырех углах; *г* — навитой из ленты разрезной стыковой; *д* — стыковой, собранной из плоских пластин.

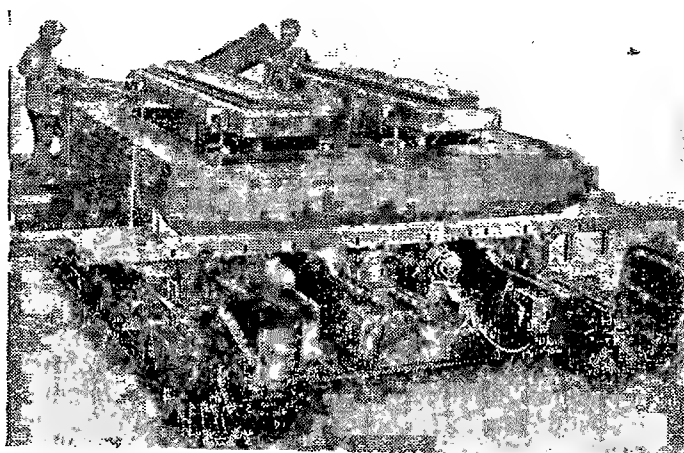


Рис. 2-5. Сборка магнитной системы трансформатора мощностью 10 000 кВ·А класса напряжения 110 кВ на специальном стенде.

стержней внутри обмоток, уложенных на специальном стенде. После завершения шихтовки и стяжки ярм балками обмотки оказываются размещенными на остовах трансформатора.

В магнитных системах, собираемых из холоднокатаной текстурованной стали, прямоугольная форма пластин и прямые стыки пластин стержня и ярма способствуют возникновению повышенных потерь и понижению магнитной проницаемости стали в зоне сопряжения стержня и ярма. Эти магнитные системы следует собирать с косыми стыками пластин во всех или в части стыков стержней и ярм, например по рис. 2-4, б или в.

Развитие производства холоднокатаной рулонной стали позволило найти новый способ изготовления магнитной системы, когда отдельные части системы навиваются из стальной ленты и затем скрепляются в единую конструкцию. Навитые системы могут быть неразрезными (рис. 2-7, б), когда обмотки из обмоточного провода или из фольги наматываются непосредственно на стержни магнитной системы, или стыковыми, когда для насадки обмоток стержни магнитной системы разрезаются резом, перпендикулярным к продольной оси стержня, и навитая магнитная система становится стыковой (рис. 2-4, г).

Плоские стыковые магнитные системы с отдельно собираемыми стержнями и ярмами (рис. 2-4, д) требуют по сравнению с шихтованными более массивного и прочного крепления стержней и ярм и специальных конструкций для стяжки стержней с ярмами в виде металлических башмаков, стяжных шпилек и т. д. Кроме того, в стыковых магнитных системах в целях уменьшения немагнитных зазоров приходится собирать стержни и ярма на специальных магнитных плитах, применять магнитные клеи, обрабатывать стыковые поверхности стержней и ярм и при этом считаться с существенным повышением тока холостого хода по сравнению с током холостого хода для шихтованных и особенно навитых неразрезных магнитных систем. В советском трансформаторостроении плоские стыковые магнитные системы применяются в реакторах.

Стыковые магнитные системы могут собираться также из разрезанных навитых частей (рис. 2-4, г) или из навитых частей и частей, собранных из плоских пластин. Примером последнего варианта служит магнитная система по рис. 2-7, а, у которой стержни собраны из плоских

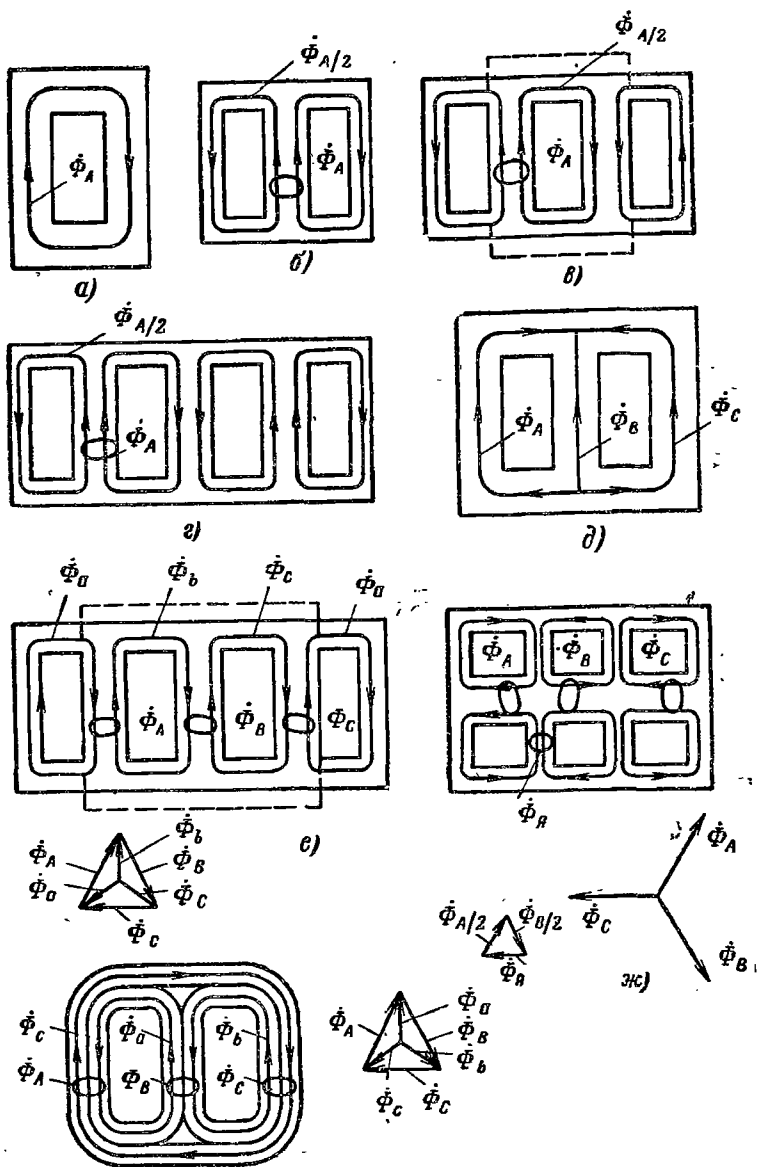


Рис. 2-6. Различные схемы плоской магнитной цепи трансформатора. Однофазные: а — стержневой; б — броневой; в и г — бронестержневые с расщеплением мощности между стержнями; трехфазные: д — стержневой; е — бронестержневой; ж — броневой; з — навитой стержневой.

пластин, а ярма навиты из холоднокатаной стальной ленты.

Выбор того или иного типа магнитной системы связан с выбором схемы магнитной цепи трансформатора, наиболее подходящей для заданных условий. Собранные впереплет плоские шихтованные магнитные системы благодаря простой и дешевой конструкции крепления и стяжки, а также относительной простоте сборки получили наиболее широкое распространение. В советском трансформаторостроении эти системы применяются для большинства силовых трансформаторов до самых мощных включительно.

На рис. 2-6 показаны различные схемы взаимного расположения стержней и ярм плоских шихтованных и плоской навитой магнитных систем. Трехфазная магнитная система по рис. 2-6, д получила наибольшее распространение для силовых трансформаторов мощностью от 5—10 до 100 000 кВ·А. При этой схеме магнитный поток ярма равен потоку стержня $\Phi_{\text{я}} = \Phi_{\text{с}}$ и площадь поперечного сечения ярма должна быть равна или больше площади поперечного сечения стержня.

С дальнейшим ростом мощности и размеров трансформатора обычно переходят на бронестержневые магнитные системы с разветвленными ярмами: однофазные по рис. 2-6, б и трехфазные по рис. 2-6, е. Магнитный поток ярма в однофазной магнитной системе при этом равен половине потока стержня $\Phi_{\text{я}} = \Phi_{\text{с}}/2$, в трехфазном $\Phi_{\text{я}} \approx \Phi_{\text{с}}/\sqrt{3}$. Это обстоятельство позволяет уменьшить сечение, а следовательно, и высоту ярма и общую высоту трансформатора, что важно для трансформаторов большой мощности, размеры которых по высоте жестко ограничиваются условиями транспортировки по железной дороге.

При мощности однофазного трансформатора 133 тыс. кВ·А и более, когда одно только разветвление ярм недостаточно снижает высоту трансформатора, прибегают к «расщеплению» мощности между двумя или тремя отдельными стержнями, например по схеме рис. 2-6, г. Для этих схем сечение ярма также может быть взято равным половине сечения стержня, так как магнитный поток ярма в однофазной магнитной системе равен $\Phi_{\text{с}}/2$. Применяя бронестержневые магнитные системы с разветвленными ярмами и «расщеплением» мощности между отдельными стержнями, добиваются существенного снижения высоты трансформатора за счет увеличения длины и некоторого увеличения массы активных материалов — меди и стали.

В схеме плоской навитой магнитной системы по рис. 2-6, з магнитный поток каждого стержня является геометрической суммой потоков двух навитых колец. Например поток фазы А можно представить в виде суммы

$\Phi_A = \dot{\Phi}_a + (-\dot{\Phi}_c)$. Поскольку три кольца этой магнитной системы навиваются раздельно, а для удобства сборки между ними должен соблюдаться небольшой технологический зазор, переход магнитного потока из одного кольца в другое затруднен и фактическая индукция в каждом кольце должна быть в $2/\sqrt{3}$ раз больше общей расчетной индукции в стержне. Подобное сложение потоков

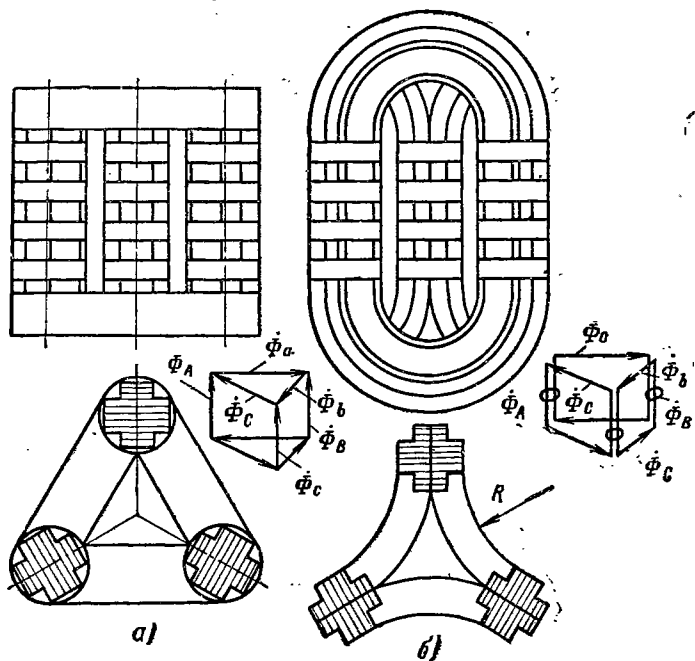


Рис. 2-7. Пространственные магнитные системы.

a — стыковая со стержнями, собранными из плоских пластин и навитыми ярами; *б* — навитая неразрезная, состоящая из трех навитых колец.

стержней и ярм в схеме по рис. 2-6, *e* не приводит к увеличению индукции потому, что в каждом стержне оба частичных потока складываются в одних и тех же пластинах.

В последние годы в трансформаторах мощностью до 6300 кВ·А все более широкое применение находят пространственные магнитные системы различных конструкций. На рис. 2-7 показаны методы образования таких

систем. Стыковая магнитная система по рис. 2-7, а, составляется из стержней, собранных из плоских пластин различной ширины, но одинаковой длины и из ярм, навитых из ленточной стали. Обмотки на эту систему устанавливаются при ее сборке из отдельных частей.

Магнитный поток в ярме такой системы $\Phi_{\text{я}} = \Phi_{\text{с}} / \sqrt{3}$, и площадь поперечного сечения ярма может быть в $\sqrt{3}$ раз меньше площади поперечного сечения стержня. С учетом увеличения общей длины ярма эта система, как показали исследования, дает возможность уменьшить массу активной стали и потери холостого хода примерно на 12—15% при увеличении тока холостого хода на 50—90% для трансформаторов мощностью 630—160 кВ·А и на 90—140% для трансформаторов 100—25 кВ·А по сравнению с плоской шихтованной системой и требованиями ГОСТ 12022-66.

Навитая неразрезная магнитная система по рис. 2-7, б состоит из трех навитых колец, которые перед сборкой системы подвергаются деформации — изгибаются по кривой с радиусом R и затем отжигаются. Сечение стержня образуется ступенчатыми сечениями двух колец. Эта система дает возможность некоторой экономии стали и уменьшения потерь холостого хода при существенном (в 2—3 раза) уменьшении тока холостого хода. Обмотки наматываются после сборки системы непосредственно на ее стержни на специальном станке. Применение этой системы реально возможно в трансформаторах мощностью до 630 кВ·А.

В магнитной системе по рис. 2-7, б с отдельно намотанными кольцами индукция в каждом кольце аналогично системе по рис. 2-6, з в $2/\sqrt{3}$ больше общей расчетной индукции в стержне. Геометрическое сложение магнитных потоков стержней и ярм в системе по рис. 2-7, а с пластинами, расположенными, как показано на этом рисунке, не приводит к увеличению индукции, так же как и в системе по рис. 2-6, е.

После завершения сборки магнитной системы ее стержни, как правило, опрессовываются и стягиваются бандажами из стеклоленты. В трансформаторах мощностью не более 630 кВ·А, при диаметре стержня не более 22 см, в плоских шихтованных системах возможна опрессовка стержня после насадки обмоток путем расклинивания с внутренней обмоткой. Ярма плоских систем обыч-

но спрессовываются ярмовыми балками, а ярма пространственных систем — специальными стяжными конструкциями.

Магнитная система со всеми узлами и деталями, служащими для соединения ее отдельных частей в единую конструкцию, называется остовом трансформатора. На

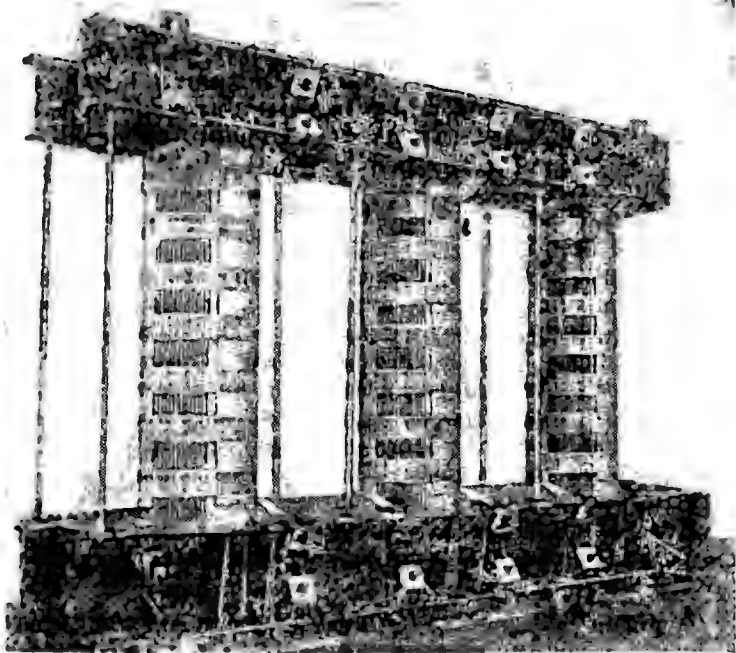


Рис. 2-8. Остов трехфазного трансформатора мощностью 25 000 кВ·А класса напряжения 110 кВ.

остове в процессе дальнейшей сборки устанавливаются обмотки и крепятся отводы, т. е. проводники, служащие для соединения обмоток трансформатора с переключателями, вводами и другими токоведущими частями.

На рис. 2-8 изображен остов трехфазного трансформатора мощностью 25 000 кВ·А класса напряжения 110 кВ. Стержни плоской шихтованной магнитной системы стянуты бандажами из стеклоленты. Многоступенчатые ярма запрессованы между стальными ярмовыми бал-

ками, стянутыми стальными полубандажами. Концы шпилек полубандажей с гайками выведены на наружные стороны ярмовых балок. Верхние и нижние ярмовые балки соединены вертикальными шпильками.

Основным элементом обмотки трансформатора является виток — электрический проводник или несколько параллельно соединяемых проводников, однократно охватывающих часть магнитной системы. Ток витка совместно с токами других витков и других частей трансформатора, в которых возникает электрический ток, создает магнитное поле трансформатора. Под воздействием этого поля в каждом витке наводится э. д. с.

Обмоткой называется совокупность витков, образующих электрическую цепь, в которой суммируются э. д. с., наведенные в витках, с целью получения высшего, среднего или низшего напряжения трансформатора или с другой целью.

Обмотки высшего, среднего и низшего напряжения предназначаются для преобразования электрической энергии и являются основными обмотками. Кроме них в силовом трансформаторе могут быть и вспомогательные обмотки, предназначенные для компенсации отдельных частей магнитного поля, дополнительного подмагничивания отдельных частей магнитной системы и для других целей.

В течение нескольких десятилетий обмотки трансформаторов изготавливались из медного провода. В последнее время в обмотках трансформаторов мощностью до 16 000—25 000 кВ·А все большее применение находит алюминиевый провод. Обмотки трансформаторов мощностью до 630 кВ·А могут изготавливаться также из алюминиевой фольги.

Обмотки трансформаторов различают по назначению, по способу взаимного расположения и по форме.

В двухобмоточном трансформаторе, имеющем две электрически не связанные между собой обмотки, различают обмотку высшего напряжения ВН, присоединяемую к сети более высокого напряжения, и обмотку низшего напряжения НН, присоединяемую к сети более низкого напряжения. В трехобмоточном трансформаторе, имеющем три электрически не связанные между собой обмотки, различают обмотку высшего напряжения ВН, обмотку среднего напряжения СН и обмотку низшего напряжения НН.

В трехфазном и многофазном трансформаторе под обмоткой подразумевают совокупность соединяемых между собой обмоток одного напряжения всех фаз, а в однофазном — обмоток всех его стержней. Иногда, если это не вызывает неправильного понимания, под словом

«обмотка» подразумевают обмотку одной фазы или одного стержня трансформатора.

По способу расположения их на стержне обмотки трансформаторов подразделяются на концентрические и чередующиеся. Концентрическими обмотки называются в том случае, когда обмотки НН и ВН (а в трехобмоточных трансформаторах и обмотки СН) выполняются каждая в виде цилиндра и располагаются на стержне концентрически одна относительно другой (рис. 2-9, а). Высота (осевые размеры) обеих обмо-

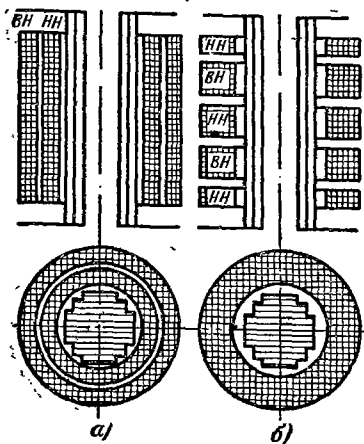


Рис. 2-9. Концентрические (а) и чередующиеся (б) обмотки двухобмоточного трансформатора.

ток, как правило, делается равной. При выполнении обмоток ВН и НН с различными высотами приходится считаться со значительным возрастанием осевых механических сил, возникающих в обмотках при коротком замыкании трансформатора, тем больших, чем больше разность высот обмоток. При концентрическом расположении обмотка НН обычно располагается внутри, а обмотка ВН — снаружи. При расположении обмотки ВН снаружи упрощается вывод от нее ответвлений для регулирования напряжения, а также уменьшаются размеры внутренних изоляционных каналов между внутренней обмоткой и стержнем

Обмотки называются чередующимися, если обмотки ВН и НН выполняются в виде невысоких цилиндров с одинаковыми или почти одинаковыми средними диаметрами и располагаются на стержне одна над другой в осевом направлении стержня (рис. 2-9, б). При этом стараются для уменьшения возникающих при коротком замыкании осевых механических сил разделить обе обмотки не в ущерб конструктивным соображениям на возможно большее число череду-

ющихся групп. Изменение числа групп позволяет также в широких пределах изменять реактивную составляющую напряжения короткого замыкания — увеличивающуюся с уменьшением числа групп и уменьшающуюся с его увеличением. Для уменьшения радиальных механических сил стараются выдержать для обеих обмоток одинаковые внутренние диаметры и радиальные размеры.

В чередующейся обмотке приходится рассчитывать по испытательному напряжению обмотки ВН несколько промежутков — горячзонных каналов между обмотками ВН и НН. Число этих промежутков растет с ростом числа групп, на которые разбита обмотка. Поэтому чередующиеся обмотки обладают меньшей компактностью, чем концентрические. К недостаткам чередующихся обмоток следует отнести также значительное число паяк соединений каждой из обмоток в процессе сборки трансформатора, тогда как большинство конструкций концентрических обмоток допускает изготовление всей обмотки ВН или НН на один стержень непосредственно на обмоточном станке, одним проводом яля группой проводов без применения пайки.

В настоящее время подавляющее большинство всех силовых трансформаторов общего назначения и специальных выполняется с концентрическими обмотками. Чередующиеся обмотки находят применение в специальных типах трансформаторов, предназначенных для питания электропечей. В таких трансформаторах с весьма значительными токами на стороне НН решающим обстоятельством является удобство параллельного соединения ряда групп обмотки НН снаружи обмотки, а изоляционные промежутки при относительно малом напряжении ВН обычно невелики. Чередующиеся обмотки иногда применяются для сухих трансформаторов как обеспечивающие лучший доступ охлаждающего воздуха к обмоткам как высшего, так и низшего напряжения.

В трехобмоточных трансформаторах обмотка СН обычно располагается между обмотками НН и ВН (рис. 2-10, а). Для некоторых типов трансформаторов предусмотрена также возможность размещения обмотки СН непосредственно на стержне со следующим расположением обмоток, считая изнутри наружу: СН—НН—ВН. Как правило, все три обмотки трехобмоточного трансформатора рассчитываются на одинаковую номинальную мощность. При различии номинальных мощностей трех обмоток номинальной мощностью трехобмоточного трансформатора считается большая из них.

Силовые автотрансформаторы, как правило, выпускаются трехобмоточными. Обмотки ВН и СН соединены по автотрансформаторной схеме, т. е. имеют общую часть X_{Am} (рис. 2-10, б) и последовательно соединенную с ней часть A_mA . Обмотка СН стержня обрывается частью X_{Am} , обмотка ВН соединением частей X_{Am} и A_mA . Напряжение ВН может быть получено на зажимах АХ, напряжение СН — на зажимах A_mX . С обмоткой НН эти две обмотки связаны индуктивно.

В двухобмоточных трансформаторах большой мощности находит применение двойная концентрическая обмотка ВН, при которой уменьшаются индукция поля рассеяния и добавочные потери в обмотках. Обмотка ВН при этом разделяется на две цилиндрические части, располагаемые внутри и снаружи обмотки НН (рис. 2-10, в).

В двухобмоточных трансформаторах мощностью 25 000 кВ·А и выше широкое применение находят рас-

щепленные обмотки. При этом обмотка НН разделяется на две, гальванически не связанные части равной мощности с одинаковыми или различными напряжениями. Обмотка ВН также разделяется на две параллельно соединенные части так, чтобы напряжения короткого замыкания двух частей обмотки НН по отношению к обмотке ВН были практически равны (рис. 2-10, з). Рас-

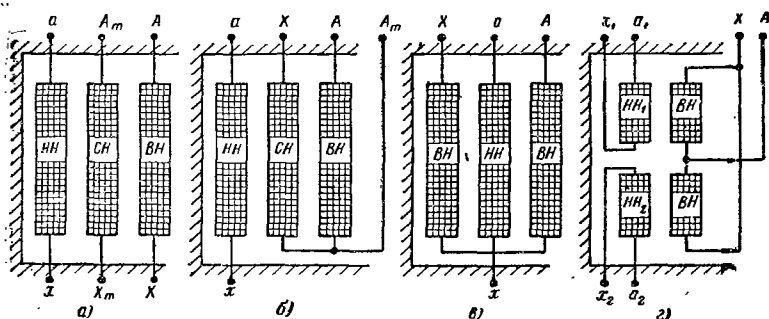


Рис. 2-10. Расположение обмоток на стержне.

а — трехобмоточный трансформатор; б — трехобмоточный автотрансформатор; в — двойная концентрическая обмотка ВН; з — трансформатор с расщепленными обмотками.

щепление обмоток имеет целью уменьшение токов короткого замыкания.

По форме выполнения обмотки трансформаторов разделяются на круглые и прямоугольные. Обмотки круглой формы выполняются в виде круговых цилиндров, сплошных или собранных из отдельных катушек, и в поперечном сечении имеют форму кольца. Обмотки прямоугольной формы в поперечном сечении имеют форму прямоугольной рамки с закругленными углами. Преимуществом такого типа обмотки является возможность наилучшего заполнения пространства внутри обмотки активной сталью стержня. Основными недостатками являются: пониженная электрическая прочность изоляции провода в углах катушки, легко повреждающейся при перегибе провода на окружности малого радиуса; усложнение прессовки стержня магнитной системы; малая механическая прочность обмотки такого типа при коротком замыкании. При коротком замыкании прямоугольная обмотка под воздействием возникающих в ней механиче-

ских сил стремится принять круглую форму, что ведет к повреждению изоляции и разрушению обмотки.

В настоящее время большинство трансформаторов выпускается с обмотками круглой формы, более простыми в конструктивном и более прочными в механическом и электрическом отношениях. Прямоугольные обмотки применяются в редких случаях для специальных трансформаторов, выполняемых с магнитными системами броневого типа.

После установки или намотки непосредственно на стержни остова трансформатора его обмоток, на остова устанавливается конструкция для размещения и укрепления отводов, т. е. проводников, соединяющих обмотки трансформатора с вводами, переключателями и другими токоведущими частями, монтируются отводы и регулирующее устройство. Полученная в результате этого монтажа единая конструкция, включающая в собранном виде остов трансформатора, обмотки с их изоляцией, отводы, части регулирующего устройства, а также все детали, служащие для их механического соединения, называется активной частью трансформатора (рис. 2-11).

Во время работы трансформатора в его обмотках, магнитной системе и некоторых других частях происходят потери энергии, выделяющиеся в виде тепла. При режиме продолжительной нагрузки все выделяющееся тепло должно полностью отводиться в окружающую среду. В большинстве современных силовых трансформаторов отвод тепла от обмоток и магнитной системы осуществляется через специальную масляную ванну — бак, залитый трансформаторным маслом, в который погружается трансформатор.

Масло, омывающее обмотки и магнитную систему трансформатора, нагреваясь у их поверхностей, интенсивно отводит путем конвекции все выделяющееся в них тепло и передает его стенкам бака. Внешняя поверхность стенок бака, омываемая воздухом, отдает тепло путем конвекции и излучения. Такая система отвода тепла позволяет допустить высокие электромагнитные нагрузки активных материалов — металла обмоток и стали магнитной системы и получить трансформатор с малой массой этих материалов.

Масляный бак с гладкими стенками имеет относительно малую омываемую воздухом внешнюю поверхность, которой оказывается достаточно для отвода тепла

потерь при допустимых превышениях температуры обмоток, магнитной системы и масла в верхней части бака над температурой охлаждающей среды лишь в трансформаторах мощностью до 25—40 кВ·А. С ростом мощности и потерь трансформатора для обеспечения его пор-

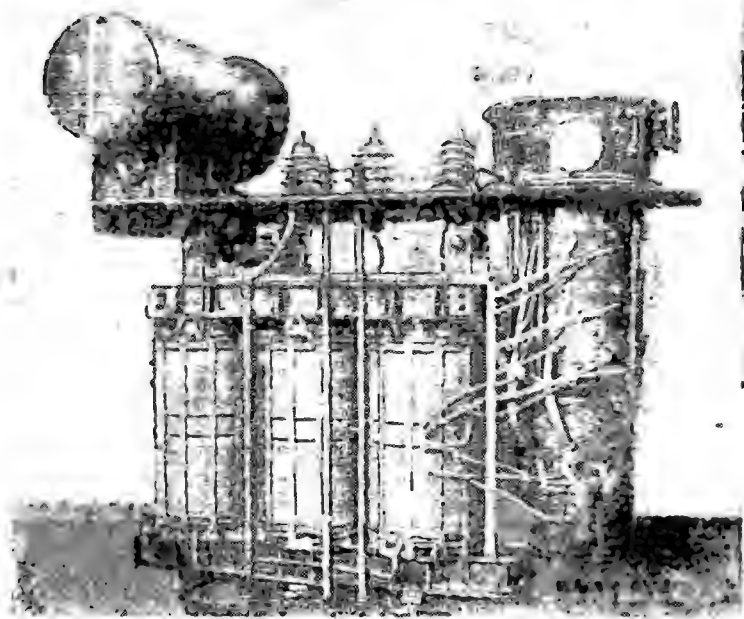


Рис. 2-11. Активная часть трехфазного масляного трансформатора мощностью 1000 кВ·А класса напряжения 35 кВ с регулированием напряжения под нагрузкой.

мального охлаждения приходится искусственно развивать внешнюю поверхность бака путем установки ребер, труб, навесных радиаторов (рис. 2-12) и других элементов, отдающих тепло при естественной конвекции воздуха. У трансформаторов мощностью 10—16 тыс. кВ·А и более поверхность бака оказывается недостаточной для размещения навесных радиаторов, работающих при естественной циркуляции масла и воздуха. Поэтому, начиная с этих мощностей, обычно усиливают охлаждение, применяя искусственное форсирование движения воздуха

у внешних поверхностей радиаторов при помощи вентиляторов или масла у внутренних их поверхностей при помощи насосов либо же совмещают эти два метода.

Форсированное движение масла особенно эффективно увеличивает теплоотдачу, если поступающее из охладителя масло специальными устройствами направляется непосредственно к обмоткам и

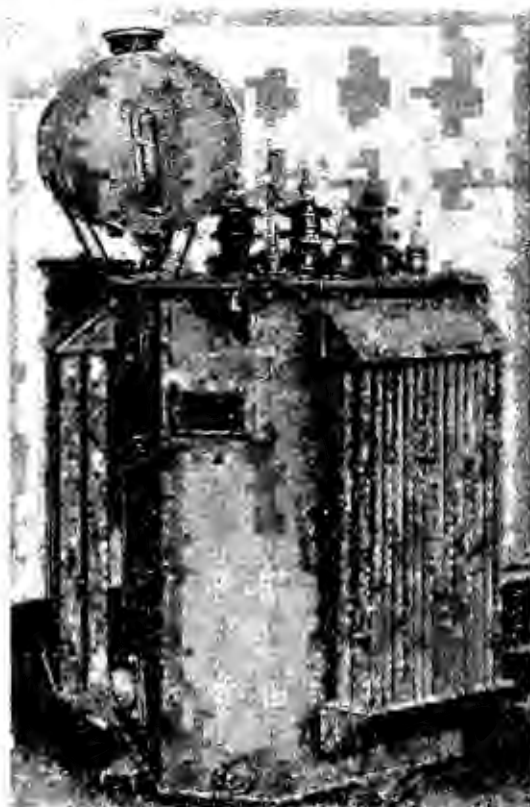


Рис. 2-12. Трехфазный масляный трансформатор мощностью 250 кВ·А класса напряжения 10 кВ с пространственной магнитной системой.

магнитной системе. При мощностях 80 000—100 000 кВ·А и более используются компактные охладители, собираемые из оребренных труб, рассчитанные на теплоотдачу от 50 до 200 кВт с каждого охладителя и продуваемые в горизонтальном направлении мощными

вентиляторами (см. рис. 1-1). Применяется также охлаждение масла в водяных охладителях.

Для заполнения бака трансформатора маслом до самой крышки при всех возможных в эксплуатации колебаниях температуры и объема масла над крышкой устанавливается расширитель — стальной бачок, сообщающийся с основным баком трубопроводом. Объем расширителя (обычно 8—10% объема масла в баке) выбирается таким, чтобы при любых колебаниях температуры и объема масла его верхний уровень оставался в пределах расширителя. Установка расширителя, ранее называвшегося консерватором, способствует также сохранению (консервации) масла, так как позволяет свести к минимуму поверхность соприкосновения (зеркало) масла с воздухом.

Если внутренний объем расширителя сообщается с окружающим воздухом, то на пути движения воздуха устанавливается фильтр, заполненный сорбентом — веществом, поглощающим влагу из воздуха, поступающего в расширитель. Для более надежного предохранения масла от окисления его поверхность в расширителе часто изолируется от окружающего трансформатор воздуха подушкой из инертного газа (азота) и расширитель герметизируется наглухо или при помощи гибкой растягивающейся мембраны (пленки).

На крышке бака устанавливаются вводы, служащие для присоединения внешней сети к обмоткам трансформатора; на крышке и частично на стенках бака устанавливаются также различные устройства и приспособления, служащие для защиты трансформатора и измерения температуры масла, для наблюдения и ухода за маслом и для подъема трансформатора.

Трансформаторное масло одновременно является хорошим изоляционным материалом, позволяющим получить высокую электрическую прочность трансформатора при малых изоляционных промежутках, компактной конструкции обмоток и магнитной системы.

Основной недостаток масляных трансформаторов заключается в том, что масло является горючим материалом и установка таких трансформаторов во многих случаях требует специальных мер пожарной безопасности.

Помимо масляных в практике все более широкое применение находят сухие силовые трансформаторы,

т. е. трансформаторы с естественным воздушным охлаждением. У этих трансформаторов масляный бак заменяется легким защитным кожухом. Отсутствие масла в значительной мере повышает пожарную безопасность, а применение в качестве твердой изоляции

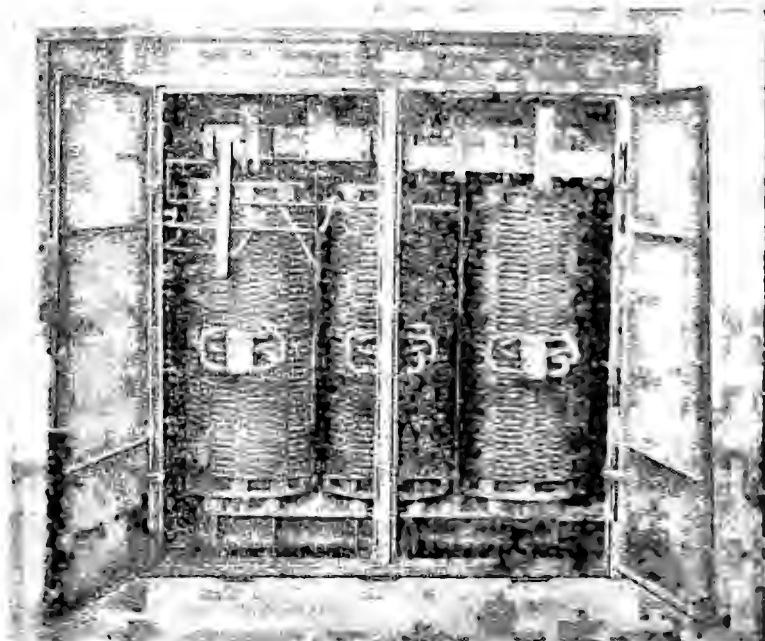


Рис. 2-13. Трехфазный сухой трансформатор мощностью 1000 кВ·А класса напряжения 10 кВ с открытыми дверцами кожуха.

обмоток стекловолокна или асбеста и кремнийорганических материалов позволяет получить практически пожаробезопасную установку (рис. 2-13).

Это свойство сухих трансформаторов позволяет применять их с большим успехом для установки внутри сухих помещений в тех случаях, когда обеспечение пожарной безопасности установки является решающим обстоятельством, как например, в установках высотных зданий, некоторых производственных цехов, лабораторий и т. д.

Воздух является менее совершенной изолирующей и охлаждающей средой, чем трансформаторное масло. Поэтому в сухих трансформаторах приходится все изоляционные промежутки и охлаждающие каналы делать большими, а электромагнитные нагрузки активных материалов допускать меньшими, чем в масляных трансформаторах. Вследствие этого масса и стоимость активных материалов в сухих трансформаторах оказываются существенно повышенными по сравнению с масляными. В то же время понижение электромагнитных нагрузок — плотности тока в обмотках и индукции в магнитной системе, позволяет получить в сухих трансформаторах потери короткого замыкания, ток и во многих случаях потери холостого хода ниже, чем в масляных. Благодаря отсутствию масла и замене тяжелого бака легким кожухом общая масса сухого трансформатора при мощностях до 400 кВ·А составляет не более 125—130%, а при мощностях 630—1600 кВ·А — около 100% массы идентичного масляного трансформатора.

Увеличение стоимости сказывается особенно сильно с ростом мощности трансформатора и напряжений его обмоток. Практически напряжения обмоток ВН сухих трансформаторов ограничиваются верхним пределом 10—15 кВ и мощность — значениями 1600—2500 кВ·А. Сухие трансформаторы большей мощности выпускаются сравнительно редко.

Методика и последовательность расчета сухих и масляных трансформаторов принципиально одинаковы. Некоторые особенности расчета сухих трансформаторов — допустимые нагрузки активных материалов, допустимые изоляционные расстояния, нагрев обмоток и т. д. — отражены в следующих главах.

Иногда в целях обеспечения пожарной безопасности трансформаторы заливают негорючей и неокисляющейся жидкостью — совтолом, представляющим смесь совола (полихлордифенил) с трихлорбензолом. Добавка трихлорбензола позволяет получить понижение вязкости и температуры застывания смеси. Для стран с умеренным климатом наилучшим соотношением считается 65% совола и 35% трихлорбензола; для условий тропического климата соответственно 90 и 10%.

В практике зарубежных фирм аналогичные жидкости называются клофен, пиранол, пирохлор и др.

Электрическая прочность совтола близка к прочности трансформаторного масла. Условия теплоотдачи в трансформаторах, залитых совтолом, практически не отличаются от условий теплопередачи в масляных трансформаторах. Применение совтола ограничи-

вается более высокой по сравнению с маслом ценой, большим расходом этой жидкости вследствие высокой плотности (около 1500 кг/м^3), токсичностью паров совтола, действующих раздражающим образом на слизистые оболочки и кожу человека, и способностью совтола выделять токсичные газообразные вещества при воздействии электрической дуги.

2-2. КОНСТРУКЦИИ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

При расчете и конструировании магнитной системы трансформатора в первую очередь должны быть предусмотрены: получение возможно меньших потерь и тока холостого хода, минимальный расход электро-технической стали и возможно больший коэффициент заполнения сталью пространства внутри обмоток. Магнитная система (остов) служит также и механической основой трансформатора. На остоле располагаются и укрепляются обмотки и отводы от обмоток, и в некоторых конструкциях на остоле в процессе сборки трансформатора укрепляется крышка бака с вводами и различной арматурой. При коротких замыканиях остов и магнитная система воспринимают также механические силы, возникающие между обмотками трансформатора. Вследствие этого одним из основных требований, предъявляемых к остоу, является также требование механической прочности и устойчивости.

Поперечное сечение стержня в стержневых магнитных системах обычно имеет вид симметричной ступенчатой фигуры, вписанной в окружность (рис. 2-14). Диаметр этой окружности d называется диаметром стержня трансформатора и является одним из основных его размеров. Чистое сечение стали в поперечном сечении стержня или ярма называется активным сечением стержня или ярма.

Число ступеней, определяемое по числу углов стержня в одной четверти круга, может быть различным. Увеличение числа ступеней увеличивает коэффициент заполнения площади круга площадью ступенчатой фигуры, но одновременно увеличивает число типов пластин, имеющих различные размеры, чем усложняет заготовку пластин и сборку магнитной системы.

Для ориентировки в этом вопросе могут служить табл. 2-1 и 2-2, в которых приведены числа ступеней

в стержнях современных трехфазных масляных и сухих трансформаторов различной мощности.

Магнитная система трансформатора собирается из пакетов пластин тонколистовой электротехнической стали толщиной 0,35 мм (ГОСТ 802-58). Применение

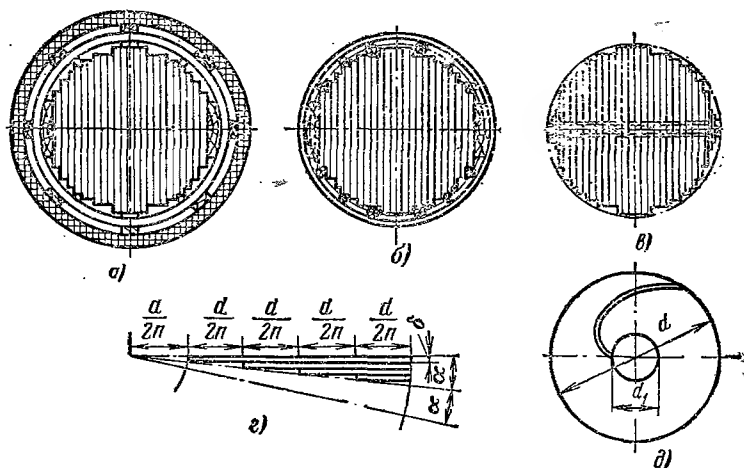


Рис. 2-14. Различные способы сборки и прессовки стержня.

Прессовка стержня: а — путем расклинивания с жестким цилиндром обмотки НН; б — бандажами из стеклоленты; в — сквозными стяжными шпильками. Сборка стержня: г — из радиально расположенных пластин; д — из пластин эвольвентной формы.

стали с толщиной листов 0,5 мм не рекомендуется потому, что удельные потери в этой стали на 30—40% выше, чем в стали с толщиной листов 0,35 мм.

Ширина пластин, определяющая ширину и толщину пакетов, образующих сечение стержня, выбирается так, чтобы при заданном диаметре было обеспечено получение наибольшего сечения стержня при максимальном использовании и минимальных отходах листовой или рулонной стали. Для ширины пластин существует нормализованная шкала (§ 8-1).

Стержни и ярма шихтованной магнитной системы должны быть стянуты и скреплены так, чтобы остов представлял собой достаточно жесткую конструкцию как механическая основа трансформатора. Стяжка и крепление остова должны обеспечивать его достаточную механическую прочность после расшихтовки верх-

Таблица 2-1

Число ступеней в сечении стержня современных трехфазных масляных трансформаторов

Показатели		Прессовка стержня расклиниванием с обмоткой, сечение стержня без каналов									
Мощность трансформатора S , кВ·А		до 16		16		25		40—100		160—630	
Ориентировочный диаметр стержня d , см		до 8		8		9		10—14		16—18	
Без прессующей пластины	Число ступеней	1	2	3	4	5	6	6	7	8	8
	Коэффициент $k_{кр}$	0,636	0,786	0,851	0,861	0,890	0,91—0,92	0,913	0,918	0,928	0,928
С прессующей пластиной	Число ступеней	—	—	—	—	—	—	—	6	7	7
	Коэффициент $k_{кр}$	—	—	—	—	—	—	—	0,884	0,901	0,901
Прессовка стержня бандажами, сечение стержня диаметром от 36 см и выше, имеет продольные каналы											
Мощность трансформатора S , кВ·А		1000—1600		2500—6300		10 000		16 000		32 000—80 000	
Ориентировочный диаметр стержня d , см		24—26		28—30		32—34		36—38		40—42	
Без прессующей пластины	Число ступеней	8	8	9	9	11	14	15	16	16	16
	Коэффициент $k_{кр}$	0,925	0,928	0,929	0,913	0,922	0,927	0,927	0,929	0,931	0,931
С прессующей пластиной	Число ступеней	7	7	8	8	10	13	14	15	15	15
	Коэффициент $k_{кр}$	0,900	0,9—0,91	0,912	0,89—0,90	0,907	0,912	0,914	0,918	0,920	0,920

Примечания: 1. В коэффициенте $k_{кр}$ учтено наличие охлаждающих каналов в сечении стержня.

2. При использовании таблицы для однофазного или трехфазного трансформатора его мощность умножить на 1,5.

3. Для пространственной магнитной системы по рис. 2-7, а значение $k_{кр}$ полученное из таблицы, уменьшить на 0,02.

**Число ступеней в сечении стержня современных
трехфазных сухих трансформаторов**

Мощность транс- форматора S , кВ·А	До 10	10	16—100		160—400		630— 1000	1600
Ориентировочный диаметр стержня d , см	До 8	8,0	9,0—14		16—22		24—26	28—32
Число ступеней	3	4	5	6	7	8	7	8
Коэффициент $k_{кр}$	0,851	0,877	0,915	0,920	0,930	0,935	0,800	0,820
Наличие продоль- ных каналов	Без каналов						Один канал	Два канала

Примечания: 1. В коэффициенте $k_{кр}$ учтено наличие охлаждающих каналов в сечении стержня.

2. До диаметра стержня $d=22$ см стержень прессуется расклиниванием с обмоткой, при $d>22$ см прессовка осуществляется бандажами.

3. При использовании таблицы для однофазного трансформатора его мощность умножить на 1,5.

него ярма при насадке обмоток, при подъеме активной части трансформатора и при коротком замыкании на его обмотках, а также обеспечивать отсутствие свободной вибрации пластин и минимальный уровень шума при работе трансформатора в сети. Эти требования достаточно хорошо удовлетворяются при равномерно распределенном напряжении сжатия между пластинами стержня и ярма 0,4—0,6 МПа (4—6 кгс/см²), считая по среднему, т. е. наиболее широкому пакету.

Прессовка стержней может осуществляться различными способами. При мощности трехфазного трансформатора до 630 кВ·А и диаметре стержня до 22 см включительно хорошие результаты дает прессовка его без применения специальных конструкций путем забивания деревянных стержней и планок между стержнем и обмоткой НН или ее жестким изоляционным бумажно-бакелитовым цилиндром (рис. 2-14, а). Стержни трансформаторов большей мощности от 1000 кВ·А и выше, при диаметре $d>22$ см нуждаются в более надежной прессовке. В этом случае хороший результат может быть достигнут при стяжке стержня бандажами из стеклоленты, расположенными по высоте стержня на расстояниях 12—15 см один от другого (рис. 2-14, б).

Перед наложением бандажей при сборке на специальном стенде стержни поочередно опрессовываются прессующей балкой с общим усилием от 0,4 до 1,0—2,0 МН (от 40 до 100—200 тс), создающей необходимое напряжение сжатия между пластинами, или опрессовывают стержни при помощи временных технологических цепных бандажей, затягиваемых вручную. Намотка бандажей из стеклоленты производится на опрессованные стержни. Этот способ стяжки обеспечивает равномерное сжатие всего стержня и достаточную механическую прочность остова трансформатора. Возможна также стяжка стержней бандажами из стальной ленты, размещаемыми на расстоянии 24 см один от другого. Эти бандажи должны замыкаться на пряжках из диэлектрика во избежание появления короткозамкнутого витка и должны заземляться во избежание накопления на них электрических зарядов.

Конструкция прессовки стержня шпильками, проходящими сквозь пластины всех его пакетов (рис. 2-14, в), применявшаяся в течение ряда лет в магнитных системах из горячекатаной стали, является нерациональной потому, что не обеспечивает равномерного распределения давления между пакетами и способствует появлению «веера», т. е. расхождения пластин на углах ступеней, а также требует наличия на заводе большого прессового и инструментального хозяйства. Проштамповка отверстий в пластинах уменьшает активное сечение и вызывает ухудшение магнитных свойств стали. Индукция в зоне, прилегающей к отверстиям, увеличивается, и направление линий магнитной индукции расходится с направлением прокатки. Вследствие этих причин возрастают удельные потери и удельная намагничивающая мощность стали. Эта конструкция особенно нерациональна для магнитных систем из холоднокатаной стали, весьма чувствительной к механическим воздействиям и обладающей анизотропией магнитных свойств. Для этой стали при толщине 0,35 мм увеличение потерь холостого хода трансформатора составляет от 4 до 20% и тока холостого хода от 20 до 100% в зависимости от отношения диаметра отверстия к ширине пластины и шага отверстий по оси стержня или ярма.

В навитых магнитных системах — плоской по рис. 2-6, з и пространственной по рис. 2-7, б — при навивке частей системы последовательно из лент различной

ширины сечение стержня также получается ступенчатым. При этом стержни могут стягиваться при помощи бандажей из стеклоленты или из стальной ленты. Стержни стыковой пространственной магнитной системы по рис. 2-7, а собираются из пластин разной ширины и одинаковой длины и также стягиваются бандажами. Стяжка частей стержней и ярм сквозными шпильками по рис. 2-14, в применяется в конструкциях реакторов.

Сечение стержня может быть образовано не только набором пакетов плоских пластин (рис. 2-14, а—в), но также и путем радиальной шихтовки плоских пластин (рис. 2-14, г) или набором пластин, изогнутых по форме цилиндрической эвольвентной поверхности (рис. 2-14, д). Оба эти способа сборки магнитной системы предусматривают стыковую конструкцию остова с отдельно собираемыми стержнями и ярмами. Ярма наматываются из рулонной стали или выполняются в виде набора плоских пакетов. Конструкция с пластинами эвольвентной формы удобна тем, что каждый стержень собирается из пластин одного размера. Ширина пластины — длина эвольвентной линии — зависит только от диаметров стержня — внутреннего d_1 и внешнего d .

Надлежащая прессовка стержня для этих двух конструкций может быть достигнута путем стяжки бандажами из стальной ленты или стеклоленты.

Коэффициент заполнения площади круга при радиальном расположении пластин может быть найден по рис. 2-14, г. Площадь круга может быть представлена в виде ряда элементарных секторов с углом α . Площадь сектора $P_{\text{сект}} = dn\delta/2 \cdot 2$; площадь, не заполненная пластинами (n треугольников), $P_0 = n\delta/2n \cdot 2 = d\delta/4$. Коэффициент заполнения

$$k_{\text{кр}} = \frac{P_{\text{сект}} - P_0}{P_{\text{сект}}} = \frac{n - 1}{n}.$$

Коэффициент заполнения не зависит от диаметра стержня и толщины пластин. Для значений $n=4, 5, 6, 7$ и 8 он равен соответственно $k_{\text{кр}}=0,75; 0,8; 0,833; 0,857$ и $0,875$.

При эвольвентной форме пластин (рис. 2-14, д) и общей площади круга $P_{\text{кр}} = \pi d^2/4$ незаполненными оказываются площадь в центре круга $P_{01} = \pi d_1^2/4$ и площади элементарных треугольников по внешней окружности стержня. Приближенно эти площади для n пластин можно найти так:

$$P_{02} = n \frac{\pi d \delta}{2n} = \frac{\pi d \delta}{2};$$

коэффициент заполнения

$$k_{\text{кр}} = \frac{P_{\text{кр}} - P_{01} - P_{02}}{P_{\text{кр}}} = \frac{d^2 - d_1^2 - 2d\delta}{d^2} = 1 - \frac{d_1^2}{d^2} - \frac{2\delta}{d}.$$

Ширина пластины (развертка эвольвенты)

$$b = \frac{d}{4k} (k^2 - 1 - 2k\delta),$$

где $k = d/d_1$.

В конструкциях из горячекатаной стали прессовка ярма осуществлялась при помощи ярмовых балок, стянутых шпильками, проходящими сквозь ярмо и изолированными от стали ярма и от балок (рис. 2-15, в). Это

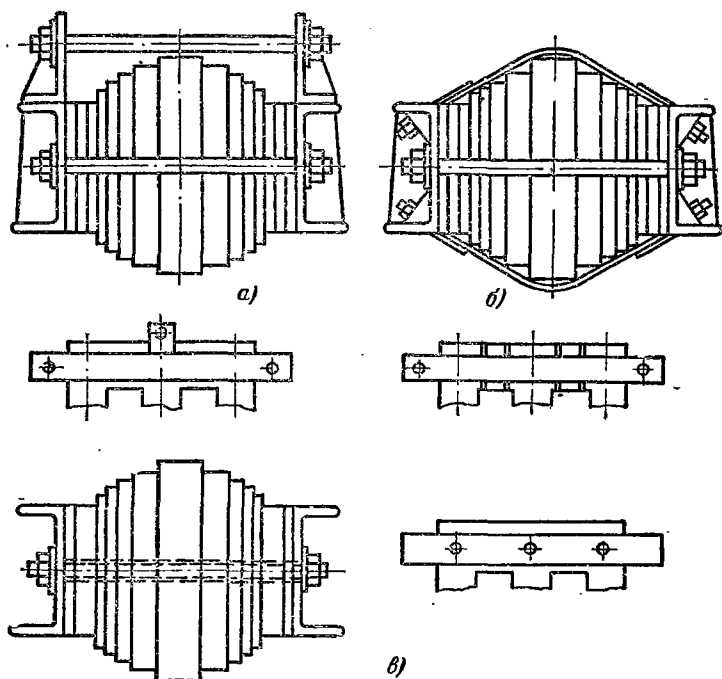


Рис. 2-15. Различные способы прессовки ярма ярмовыми балками.
а — внешними шпильками; б — стальными полубандажами; в — сквозными шпильками.

так же нерационально, как и прессовка стержней шпильками, особенно для магнитных систем, собираемых из холоднокатаной стали. Поэтому в магнитных системах современных трансформаторов мощностью до 6300 кВ·А шпильки, стягивающие ярмовые балки, выносятся за

пределы ярма (рис. 2-15, а). Стяжная шпилька над средним стержнем иногда заменяется стальной скобой с нажимным болтом. В трансформаторах большей мощности от 10 000 кВ·А и выше ярмо прессуется при помощи стальных полубандажей, стягивающих две ярмовые балки (рис. 2-15, б).

Верхние и нижние балки остова связываются стальными прессующими пластинами стержня, положенными под бандаж по оси крайнего пакета стержня и сцепленными с ярмовыми балками, или вертикальными шпильками, расположенными вне обмоток. Чтобы избежать возникновения замкнутого магнитного контура, образованного верхними и нижними ярмовыми балками и связывающими их полосами, эти полосы изготовляют из немагнитной стали и тщательно изолируют от ярмовых балок прокладками из электрокартона. Такие конструкции разгружают активную сталь от воздействия механических сил при коротком замыкании или при подъеме трансформатора.

Вертикальные шпильки, стягивающие ярмовые балки, располагаются поблизости от наружных поверхностей обмоток ВН и должны быть достаточно удалены от них или надежно изолированы. Поэтому в масляных трансформаторах классов напряжения от 220 кВ и в сухих трансформаторах от 10 кВ вертикальная стяжка производится предпочтительно пластинами, а в других случаях шпильками. При использовании прессующих пластин коэффициент заполнения круга $k_{кр}$ уменьшается (см. табл. 2-1).

Выбор правильной формы и размеров поперечного сечения ярма особенно в магнитных системах, собираемых из холоднокатаной текстурованной стали, играет существенную роль. Наиболее рациональной является многоступенчатая форма сечения ярма с числом ступеней, равным числу ступеней в сечении стержня, и активным сечением, равным или несколько большим активного сечения стержня. Для обеспечения более равномерного сжатия ярма между ярмовыми балками обычно два-три крайних пакета объединяют, несколько увеличивая их общее сечение (рис. 2-15, а). При такой форме ярма магнитный поток (индукция) практически равномерно распределяется по сечению стержня и ярма.

В целях упрощения сборки остова и уменьшения числа типов пластин с различными размерами, а также уп-

рождения опорных конструкций обмоток в магнитных системах из горячекатаной стали в течение ряда лет применялась упрощенная форма сечения ярма с малым числом ступеней (рис. 2-16, б) или прямоугольная (рис. 2-16, г). Из рис. 2-16, где за единицу принято сечение каждого пакета стержня, видно, что эти формы при равенстве полных сечений стержня и ярма не обеспечивают равенства сечений отдельных пакетов. Сечения

Рис. 2-16. Различные формы сечения ярма.

средних пакетов стержня будут больше, а сечения крайних меньше, чем сечения соответствующих пакетов ярма. Ввиду наличия между пластинами магнитной системы хотя и малых зазоров переход магнитного потока из одного пакета в другой параллельный пакет сильно затруднен, и поток в каждом пакете стержня близок к потоку в соответствующем пакете ярма. Вследствие этого возникает неравномерное распределение магнитного потока и индукции между различными пакетами. Так, в стержне наибольшая индукция наблюдается в крайних пакетах и наименьшая в среднем. В ярме наблюдается обратная картина.

Неравномерное распределение индукции между пакетами магнитной системы приводит к увеличению потерь и тока холостого хода, особенно заметному в магнитных системах, собранных из холоднокатаной стали. В магнитных системах с прямоугольным сечением ярма потери холостого хода возрастают на 5—6% и ток холостого хода на 8—10% по сравнению с системами, имеющими ярмо с числом ступеней, равным числу ступеней стержня.

Ввиду того что внешние размеры ярма не ограничены, как у стержня, внутренними размерами обмоток, его общее и активное сечения могут быть выбраны большими, чем у стержня. При этом уменьшается индукция в ярме, уменьшаются удельные потери и удельная намагничивающая мощность для стали ярма, а его масса увеличивается. Путем такого увеличения сечения можно заметно уменьшить ток холостого хода трансформатора и незначительно уменьшить потери холостого хода.

Увеличение сечения ярма характеризуется коэффициентом усиления ярма

$$k_{\text{я}} = P_{\text{я}}/P_{\text{с}},$$

где $P_{\text{я}}$ — активное сечение стали в ярме; $P_{\text{с}}$ — активное сечение стержня.

В соответствии с высказанными соображениями при выборе способов прессовки стержней и ярм, формы сечения и коэффициента усиления ярма для современных трансформаторов с магнитными системами, собираемыми из холоднокатаной стали, можно воспользоваться рекомендациями табл. 2-3. При отступлении от этих рекомендаций следует считаться с возможным увеличением потерь и тока холостого хода соответственно на 4—20 и 20—100% при стяжке стержней и ярм сквозными шпильками и на 5—6 и 8—10% при упрощении формы сечения ярма.

Стержни с диаметром до 36 см обычно достаточно хорошо охлаждаются маслом, омывающим их наружную поверхность. При диаметре от 36 см и выше для обеспечения надежного охлаждения внутренних частей стержня между его пакетами делаются охлаждающие каналы. Эти каналы могут быть продольными по отношению к пластинам стержня или поперечными. Продольные каналы стержня продолжаются и в ярмах. Вертикальный поперечный канал стержня обычно переходит в горизон-

**Выбор способа прессовки стержней и ярем, формы сечения
и коэффициента усиления ярма для современных
масляных и сухих трансформаторов**

Мощность трансформатора S , кВ·А	Прессовка стержней	Прессовка ярма	Форма сечения ярма	Коэффициент усиления ярма $k_{я}$
—25—100	Расклиниванием с обмоткой (рис. 2-14, а)	Балками, стянутыми шпильками, расположенными вне ярма (рис. 2-15, а)	3—4 ступени	1,05—1,02
160—630			С числом ступеней, равным числу ступеней стержня (или на одну — две меньше)	1,02—1,01
1000—6300	Бандажами стальными или из стеклоленты (рис. 2-14, б)	Балками, стянутыми полубандажами (рис. 2-15, б)		1,02—1,01
10 000 и более				1,01

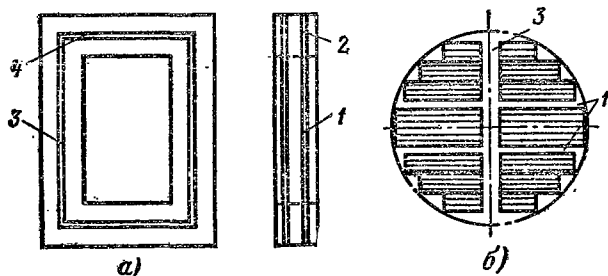


Рис. 2-17. Схема двухрамной магнитной системы однофазного трансформатора.

а — расположение каналов в системе (1 и 2 — продольные каналы стержня и ярма; 3 и 4 — поперечные каналы стержня и ярма); б — сечение стержня.

тальный поперечный канал ярма, разделяя магнитную систему на отдельные «рамы» так, как это показано, например, для однофазного трансформатора на рис. 2-17. В стержнях обычно делают не более одного поперечного канала.

Размеры и число каналов в современных трансформаторах при различных диаметрах стержня приведены в табл. 2-4.

Для диаметров стержней трансформаторов в СССР принята международная нормаль, принятая странами,

Ориентировочное число продольных по отношению к листам и поперечных охлаждающих каналов. Трехфазные трансформаторы

а) Масляные трансформаторы

Мощность трансформатора S , кВ·А	До 4000	6300—16 000	25 000—32 000	40 000—80 000
Ориентировочный диаметр стержня d , см	До 34	36—48	50—60	63—75
Число продольных каналов	—	1	2	3
Число поперечных каналов	—	—	—	—

Продолжение табл. 2-4

Мощность трансформатора S , кВ·А	100 000—630 000					
Ориентировочный диаметр стержня d , см	80—95	100—109		112—118	122—129	132—140
Число продольных каналов	4	5	6	7	8	9
Число поперечных каналов	1	1	1	1	1	1

б) Сухие трансформаторы

Мощность трансформатора S , кВ·А	До 400	630—1000	1600
Ориентировочный диаметр стержня d , см	До 22	24—26	28—32
Число продольных каналов	—	1	2

Примечания: 1. В масляных трансформаторах ширина продольного канала 0,6 см, ширина поперечного канала 1,0 см.

2. В сухих трансформаторах ширина продольного канала 2,0 см.

входящими в Совет Экономической Взаимопомощи (СЭВ). Нормализованная шкала содержит следующие диаметры, см:

8; 9; 10; 11; 12,5; 14; 16; 18; 20; 22; 24; 26; 28; 30; 32; 34; 36; 38; 40; 42; 45; 48; 50; 53; 56; 60; 63; 67; 71; 75— для магнитных систем без поперечных каналов:

80; 85; 90; 95; 100; 103; 106; 109; 112; 115; 118; 122; 125; 128; 132; 136; 140; 145; 150— для систем, имеющих поперечные каналы.

При определении полного поперечного сечения стали стержня в предварительном расчете, когда размеры пакетов пластин стержня еще не установлены, обычно пользуются коэффициентом $k_{кр}$ заполнения площади круга с диаметром d площадью ступенчатой фигуры Π_{Φ} :

$$k_{кр} = \frac{\Pi_{\Phi}}{\pi d^2/4}; \quad \Pi_{\Phi} = k_{кр} \pi d^2/4.$$

В этой формуле Π_{Φ} определяется для оптимальных размеров пакетов, дающих максимальный $k_{кр}$, за вычетом сечений каналов и с учетом места, занимаемого деталями, прессующими стержень (накладки, бандажная лента, пряжки бандажей).

Ориентировочные практические значения коэффициента для различного числа ступеней с учетом охлаждающих каналов приведены в табл. 2-1 и 2-2, данными которых можно пользоваться при предварительном расчете. При окончательном расчете магнитной цепи сечение стержня определяется по реальным размерам пакетов стержня.

2-3. ВЫБОР МАРКИ СТАЛИ И ВИДА ИЗОЛЯЦИИ ПЛАСТИН

Материалом для магнитной системы трансформатора служит главным образом холоднокатаная тонколистовая кремнистая электротехническая сталь марок Э330 и Э330А с толщиной листов 0,35 мм. Применение холоднокатаной стали марок Э310 и Э320 и горячекатаной стали марок Э41, Э42 и Э43 с толщиной листов 0,35 мм, а тем более с толщиной листов 0,5 мм для основных серий трансформаторов не рекомендуется. Поскольку сталь этих марок еще находит применение в различных второстепенных конструкциях, в дальнейшем тексте будут сообщены все необходимые данные для ее использования в расчете. Основные данные холоднокатаной и го-

**Основные характеристики марок электротехнической стали,
применяемой в трансформаторах (ГОСТ 802-58)**

Марка стали	Толщина листов, мм	Магнитная индукция B , Т, при напряженности магнитного поля, А/м (не менее)					Удельные потери $P_{B/50}$ при $f=50$ Гц и B , Т не более Вт/кг		
		300	2500	5000	10 000	30 000	1,0	1,5	1,7
Горячекатаная сталь									
Э41	0,50 0,35	1,30	1,46	1,57	1,70	1,90	1,55 1,35	3,5 3,0	—
Э42	0,50 0,35	1,29	1,45	1,56	1,69	1,89	1,4 1,2	3,1 2,8	—
Э43	0,50 0,35	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	1,25 1,05	2,9 2,5	—
Э43А	0,50 0,35	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	1,15 0,9	2,7 2,2	—
Холоднокатаная текстурированная сталь									
Э310	0,50 0,35	1,60	1,75	1,83	1,91	1,98	1,1 0,8	2,45 1,75	3,2 2,5
Э320	0,50 0,35	1,65	1,80	1,87	1,92	2,00	0,95 0,7	2,1 1,5	2,8 2,2
Э330	0,50 0,35	1,70	1,85	1,90	1,95	2,00	0,8 0,6	1,75 1,3	2,5 1,9
Э330А	0,35						0,5	1,1	1,6

Примечания: 1. Для силовых трансформаторов сталь выпускается в рулонах с шириной полосы 900 мм (импортная от 700 до 900 мм) и в листах с размерами 750×1500 и 1000×2000 мм.

2. Удельное электрическое сопротивление холоднокатаной стали $\rho = 0,50$ мкОм·м; горячекатаной $\rho = 0,60$ мкОм·м.

рячекатаной сталей различных марок по ГОСТ 802-58 приведены в табл. 2-5.

Обозначения марок стали расфигуровываются следующим образом: буква Э означает, что сталь электротехническая. Первая цифра (3, 4) обозначает степень легирования стали кремнием: 3 — высоколегированная сталь горячекатаная с содержанием от 2,8 до 3,8% и холоднокатаная от 2,8 до 3,5% кремния со средней плотностью 7650 кг/м³; 4 — высоколегированная сталь с содержанием от

3,8 до 4,8% кремния со средней плотностью 7550 кг/м³. Вторая цифра (1, 2, 3, 4) — гарантированные электромагнитные свойства стали: 1, 2 и 3 — определенные удельные потери при перемагничивании стали с частотой 50 Гц и магнитная индукция в сильных полях (1 — с нормальными удельными потерями, 2 — с пониженными, 3 — с низкими; буква А после цифры 3 означает особо низкие удельные потери), 4 — удельные потери при перемагничивании стали с частотой 400 Гц и магнитная индукция в средних полях (например, марка Э44, не приведенная в табл. 2-5). Третья цифра (0) означает, что сталь холоднокатаная текстурованная. Буква П, поставленная в конце обозначения марки, означает, что это сталь повышенной точности прокатки и повышенной отделки поверхности. Например, марка Э330АП обозначает электротехническую повышенолегированную сталь с гарантированными особо низкими удельными потерями и магнитной индукцией в сильных полях, холоднокатаную текстурованную, повышенной точности прокатки и повышенной отделки поверхности.

В течение долгого времени для силовых трансформаторов применялась горячекатаная сталь главным образом марок Э41 и Э42 с толщиной листов 0,5 мм, допускающая индукцию в магнитной системе $B=1,45$ Т.

Все новые серии трансформаторов проектируются на основе применения холоднокатаной текстурованной стали марок Э330 и Э330А, обладающей низкими или особо низкими удельными потерями, повышенной магнитной проницаемостью и позволяющей повысить индукцию в магнитной системе до $B=1,60 \div 1,65$ Т (в отдельных случаях до $B=1,7$ Т). Такое повышение индукции дает возможность уменьшить массу стали, сделать магнитную систему более компактной и уменьшить вследствие этого массу металла обмоток, а также получить трансформатор с меньшими потерями и током холостого хода и меньшими потерями короткого замыкания.

В холоднокатаной стали кристаллы ориентированы определенным образом по отношению к направлению прокатки (текстура), благодаря чему создается анизотропия магнитных свойств стали. При совпадении направления линий магнитной индукции с направлением прокатки удельные потери в стали получаются наименьшими, а магнитная проницаемость — наибольшей. При отклонении направления линий от направления прокатки происходят существенное увеличение потерь и уменьшение магнитной проницаемости. Горячекатаная сталь в очень малой степени обладает анизотропией магнитных свойств. Практически ее анизотропия учитывается только при раскросе стали тем, что осевая более длинная сторона пластины всегда располагается параллельно направлению прокатки, т. е. вдоль более длинной стороны листа.

Анизотропия магнитных свойств холоднокатаной стали заметно сказывается, например, в магнитных системах, прессуемых сквозными шпильками (§ 2-2), где

линии магнитной индукции должны огибать отверстия для шпилек и отклоняться от направления прокатки. Поэтому в магнитных системах, собираемых из пластин холоднокатаной стали, рекомендуется применять бесшпильчатые конструкции прессовки.

Применение холоднокатаной стали привело также к изменению плана шихтовки магнитных систем. На рис. 2-18, в показан план шихтовки с так называемыми прямыми стыками пластин стержней и ярм, нашедший

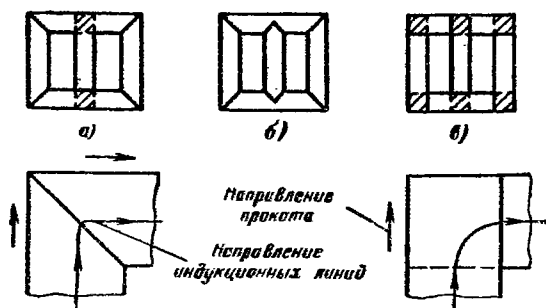


Рис. 2-18. Различные формы стыков стержней и ярм.

а — сочетание косых и прямых стыков; б — косые стыки; в — прямые стыки

широкое применение в магнитных системах из горячекатаной стали. Его использование для конструкций из холоднокатаной стали нецелесообразно потому, что в частях ярм, заштрихованных на рис. 2-18, в, вследствие несовпадения направления линий магнитной индукции с направлением прокатки листов возникнут повышенные удельные потери и увеличится удельная намагничивающая мощность. Общее увеличение потерь холостого хода трансформатора может достигнуть 20—30% и тока холостого хода 100—140%. Шихтовка по рис. 2-18, б с косыми стыками во всех сопряжениях стержней и ярм позволит избежать заметного повышения потерь и тока холостого хода. Во избежание существенного усложнения заготовки пластин обычно применяют план шихтовки по рис. 2-18, а с четырьмя косыми и двумя прямыми стыками. В этом случае следует считаться с повышением потерь холостого хода на 9—11% и тока холостого хода на 35—60%. Указанное увеличение потерь и тока холостого хода в зависимости от конструк-

ции стыков отнесено к магнитным системам с шестью косыми стыками.

Холоднокатаная сталь в значительно большей степени, чем горячекатаная, чувствительна к механическим воздействиям. В результате механической обработки при заготовке пластин магнитной системы — продольной и поперечной резки, закатки или срезания заусенцев, штамповки отверстий (в некоторых конструкциях), увеличиваются удельные потери и удельная намагничивающая мощность стали. Это ухудшение магнитных свойств стали может быть полностью или в значительной мере снято путем восстановительного отжига заготовленных пластин при температуре 800—820°C. На современных заводах такой отжиг обязательно включается в технологический процесс изготовления пластин после их механической обработки. При отсутствии отжига следует считаться с возможным повышением потерь холостого хода на 10—15% и тока холостого хода до 75%.

При дальнейшей транспортировке после отжига на сборку в процессе сборки остова и стяжки стержней и ярм пластины могут подвергаться изгибам, толчкам, ударам и давлению. При этом также возникает ухудшение магнитных свойств стали, которое в готовом остова снято отжигом быть не может. Особенно сильно магнитные свойства стали ухудшаются при изготовлении частей магнитной системы путем навивки из холоднокатаной ленты. Такие части должны отжигаться после навивки.

Обладая более высокими магнитными свойствами, холоднокатаная сталь является и более дорогим материалом, чем горячекатаная. Это видно из табл. 2-7, где показано соотношение цен и удельных потерь различных марок холоднокатаной и горячекатаной стали. При этом за 100% приняты удельные потери и цена стали марки Э330А с толщиной листов 0,35 мм. При экономической оценке применения холоднокатаной стали следует учитывать, что переход на эту сталь связан с повышением допустимой индукции и уменьшением массы активной стали и металла обмоток, а также с существенным снижением потерь холостого хода и короткого замыкания трансформатора. Вследствие этого общая стоимость активных материалов при переходе с горячекатаной на холоднокатаную сталь увеличивается относительно немно-

го, а существенное понижение потерь позволяет быстро окупить в эксплуатации дополнительные затраты на изготовление трансформатора. Более подробно этот вопрос освещен в § 11-1.

Пластины трансформаторной стали, изготовленные для сборки магнитной системы, должны быть надежно изолированы одна от другой. Изоляция пластин может осуществляться различными методами. В течение ряда лет наибольшее распространение получила лаковая изоляция пластин.

Лаковая изоляция наносится в виде пленки с двух сторон листа (лак КФ-965 ГОСТ 15030-69) на нарезанные пластины (в некоторых конструкциях и отштампованные) с последующим запеканием при температуре 450—550°C. Толщина пленки с двух сторон при однократной лакировке около 0,01 мм. Пластины для трансформаторов большой мощности подвергаются двукратной или трехкратной лакировке. Лаковая пленка создает, хотя и неполную, но практически достаточную электрическую изоляцию между пластинами; дает высокий коэффициент заполнения сечения стержня; имеет высокую теплопроводность и обеспечивает хорошее охлаждение магнитной системы; обладает высокой нагревостойкостью; достаточно прочна в механическом отношении и не повреждается при сборке. Лаковая пленка наносится после завершения механической обработки и восстановительного отжига изготовленных пластин, что позволяет с успехом применять этот вид изоляции в системах из холоднокатаной стали.

В последние годы все более широко стало применяться двустороннее жаростойкое покрытие стали в виде керамических или оксидных пленок, наносимых на металлургическом заводе после прокатки. Это покрытие не повреждается при обработке пластин стали инструментом, не оставляющим заусенцев, и выдерживает отжиг изготовленных пластин. Благодаря более тонкой пленке жаростойкое покрытие дает коэффициент заполнения сечения стержня более высокий, чем лаковая пленка. При заготовке пластин для магнитных систем трансформаторов большой мощности иногда сверх жаростойкого покрытия пластины после отжига подвергаются однократной лакировке.

Холоднокатаная стальная лента, из которой наматываются части навитых магнитных систем, должна иметь жаростойкое покрытие, не повреждающееся при длительном отжиге навитых частей.

Другие методы изоляции пластин, применявшиеся прежде, не выдерживают конкуренции с жаростойким покрытием и лаковой пленкой. Оклеяка листов стали оклеечной бумагой понижает коэффициент заполнения k_3 до 0,85—0,875; покрытие пластин фосфатной пленкой связано со сложной технологией нанесения и закрепления

Коэффициенты заполнения k_3

Сталь	Вид изоляции	Толщина листов 0,5 мм	Толщина листов 0,35 мм
Листовая	Без изоляции	0,97—0,98	0,95—0,96
	Однократная лакировка	0,95—0,96	0,93—0,94
	Двухкратная лакировка	0,93—0,94	0,91—0,92
	Трехкратная лакировка	0,91—0,92	0,89—0,90
Рулонная	Жаростойкое покрытие	—	0,95—0,96
	Жаростойкое покрытие и однократная лакировка	—	0,93—0,94

Примечание. Большее значение k_3 можно принимать при прессовке стержней и ярм прессующей балкой с последующей стяжкой бандажами.

пленки; покрытие пластин жидким стеклом дает пленку с недостаточной механической прочностью.

Коэффициент заполнения сечения стержня (или ярма) сталью, равный отношению чистой площади стали в сечении — активного сечения P_c (или P_{π}) к площади ступенчатой фигуры P_{ϕ} , т. е. $k_3 = P_c / P_{\phi.c}$, желательно иметь наиболее высоким потому, что понижение этого коэффициента ведет к увеличению массы стали системы и металла обмоток.

Коэффициент заполнения k_3 зависит от толщины листов стали (обычно 0,35 или 0,5 мм), от вида изоляции пластин, от сжатия пластин и наличия в них таких дефектов, как волнистость и коробоватость. Высота короба или волны, отнесенная к 1 м длины листа, для листовой стали ограничена ГОСТ 802-58. Рулонная сталь не должна иметь этих дефектов. Усредненные коэффициенты заполнения сталью k_3 для стали, удовлетворяющей требованиям ГОСТ 802-58, при нормальном сжатии приведены в табл. 2-6.

Общий коэффициент заполнения сталью площади круга, описанного около сечения стержня, k_c является произведением двух коэффициентов:

$$k_c = k_{кр} k_3.$$

Сравнение стали толщиной $\delta=0,35$ мм со сталью
толщиной $\delta=0,5$ мм (ГОСТ 802-58)

δ , мм	Марка	Относительные удельные потери, $\rho_{15/50}$, %	Цена относительная, %	Коэффициент заполнения k_z	Отношение числа листов в пакетах равной толщины	Отношение стоимости изделия
0,5	Э41	318	56,1	0,91—0,98	0,715	0,7
	Э42	282	58,3			
	Э43	264	62,5			
	Э310	223	59,5			
	Э320	191	70,8			
	Э330	159	80,4			
0,35	Э41	273	67,7	0,89—0,96	1,00	1,00
	Э42	254	70,8			
	Э43	228	75,0			
	Э310	159	63,5			
	Э320	136,5	77,0			
	Э330	118	89,5			
	Э330А	100	100			

В течение многих лет в практике трансформаторостроения использовалась сталь с толщиной листов 0,5 и 0,35 мм. В настоящее время для магнитных систем силовых трансформаторов применяется почти исключительно холоднокатаная рулонная сталь с толщиной 0,35 мм, имеющая удельные потери на 25—30% ниже, чем сталь тех же марок с толщиной 0,5 мм. Низкие удельные потери при этом являются решающим экономическим фактором, хотя применение этой стали связано с усложнением технологии производства трансформаторов, с увеличением трудоемкости отдельных операций сборки и удорожанием материала магнитной системы. Сравнение показателей двух толщин стали показано в табл. 2-7.

В последние годы выявилась тенденция к дальнейшему уменьшению толщины листов электротехнической

Удельные потери в стали некоторых марок иностранных фирм
 p , Вт/кг, при $f=50$ Гц, $B=1,5$ Т

Страна	Марка стали	δ , мм	p , Вт/кг	Страна	Марка стали	δ , мм	p , Вт/кг
Англия	51	0,35	1,12	Швеция	M5	0,35	1,00
»	46	0,35	1,01	»	M5	0,30	0,97
США	M6X	0,35	1,11	»	M5	0,28	0,95
»	M6	0,30	1,07	»	M4	0,28	0,89
»	M5X	0,35	1,01	Япония	Z11	0,35	1,13
Швеция	M6	0,35	1,11	»	Z11	0,30	1,08
»	M6	0,30	1,07	»	Z10	0,35	1,04

стали до 0,3—0,28 мм, что дает возможность уменьшить потери от вихревых токов и снизить общие удельные потери в стали. В табл. 2-8 приведены некоторые данные о различных марках стали, выпускаемой зарубежными фирмами.

Весьма важное значение при расчете трансформатора имеет правильный выбор индукции в стержне магнитной системы. Уменьшение индукции позволяет существенно снизить потери и ток холостого хода, но приводит к

Таблица 2-9

Рекомендуемая индукция в стержнях силовых трансформаторов B_c , Т

Марки стали	Мощность трансформатора S , кВ·А		
	до 16	25—100	160 и выше

Масляные трансформаторы

Э41—Э43	0,9—1,2	1,2—1,4	1,4—1,45
Э310, Э320	1,1—1,4	1,4—1,55	1,55—1,60
Э330, Э330А	1,2—1,5	1,5—1,6	1,55—1,65*

Сухие трансформаторы

Э41—Э43	0,9—1,0	1,0—1,2	1,1—1,2
Э310, Э320	1,1—1,3	1,35—1,40	1,4—1,45
Э330, Э330А	1,2—1,4	1,4—1,5	1,5—1,6

* В трансформаторах мощностью более 100 000 кВ·А допускается индукция до 1,7 Т.

увеличению массы стали и металла обмоток трансформатора. Увеличение индукции приводит к экономии активных материалов, но вызывает повышения потерь и особенно тока холостого хода. Рациональный выбор индукции должен производиться на основании экономических расчетов (§ 11-1). Рекомендуемые значения индукции в стержнях современных силовых трансформаторов приведены в табл. 2-9.

Глава третья

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРАНСФОРМАТОРА

3-1. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТ И СХЕМА РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРА

В задании на проект двухобмоточного трансформатора должны быть указаны следующие данные:

- 1) полная мощность трансформатора S , кВ·А;
- 2) число фаз m ;
- 3) частота f , Гц;
- 4) номинальные линейные напряжения обмоток высшего и низшего напряжений U_2 и U_1 , В; число ступеней и пределы регулирования напряжения;
- 5) схема и группа соединения обмоток;
- 6) способ охлаждения трансформатора;
- 7) режим нагрузки — продолжительный или кратковременный.

При кратковременном режиме должны быть указаны его параметры — продолжительность работы и интервалов и отдаваемая трансформатором мощность (или ток);

- 8) характер установки — внутренняя или наружная, т. е. внутри помещения или под открытым небом.

Кроме этих данных в задании обычно указываются некоторые параметры трансформатора:

- 1) напряжение короткого замыкания u_K , %;
- 2) потери короткого замыкания P_K , Вт;
- 3) потери холостого хода P_x , Вт;
- 4) ток холостого хода i_0 , %.

В задании может быть обусловлено соответствие трансформатора требованиям определенного ГОСТ. Мо-

гут быть поставлены также некоторые дополнительные условия, например определенная марка стали, выполнение обмоток из медного или алюминиевого провода и др.

Если в двухобмоточном трансформаторе предусматривается расщепление обмоток на две части, то должны быть указаны напряжения двух частей обмотки НН. Номинальная мощность каждой из этих частей обычно принимается равной половине номинальной мощности трансформатора.

Для трехобмоточного трансформатора указывается мощность каждой из трех обмоток, если они различны (номинальной считается наибольшая из мощностей трех обмоток), номинальные напряжения трех обмоток, соответственно схемы и группы соединения обмоток, три значения напряжения короткого замыкания, отнесенного к номинальной мощности трансформатора, и три значения потерь короткого замыкания для трех пар обмоток ВН и СН, ВН и НН, СН и НН.

В задании на расчет автотрансформатора обычно указывается его «проходная» мощность $S_{\text{прох}}$, равная произведению линейного напряжения U на линейный ток $S_{\text{прох}} = UI \cdot 10^{-3}$ у однофазного и $S_{\text{прох}} = \sqrt{3}UI \cdot 10^{-3}$ у трехфазного автотрансформатора. В задании указываются также первичное U и вторичное U' номинальные линейные напряжения и сетевое напряжение короткого замыкания $u_{\text{к.с.}}$, т. е. отнесенное к большему из двух номинальных напряжений U или U' .

При проектировании трансформатора в соответствии с заданием должно быть также обеспечено его соответствие современным требованиям к электрической и механической прочности и нагревостойкости обмоток и других частей и к экономичности его работы в эксплуатации. Экономичность трансформатора в эксплуатации определяется путем сопоставления стоимости трансформатора, отнесенной к определенному промежутку времени, с эксплуатационными затратами за этот промежуток и зависит в значительной мере от правильного выбора таких его параметров, как потери холостого хода и короткого замыкания. Для силового трансформатора уровни потерь холостого хода и короткого замыкания обычно устанавливаются при проектировании серий и разработке новых стандартов. При индивидуальном проектировании силового трансформатора общего или

специального назначения параметры холостого хода и короткого замыкания, как правило, задаются соответствующим ГОСТ. Получение определенных параметров достигается рациональным выбором основных размеров трансформатора, а также подбором соответствующих удельных нагрузок активных материалов — индукции в магнитной системе и плотности тока в обмотках.

Соблюдение упомянутых выше основных требований должно сочетаться с возможностью удешевления производства и уменьшения себестоимости трансформатора. Следует, однако, заметить, что увеличение себестоимости трансформатора при использовании материалов лучшего качества, хотя и более дорогих, при усложнении некоторых технологических операций или введении в технологический процесс новых операций, существенно улучшающих параметры трансформатора или повышающих его надежность, в большинстве случаев оправдывается при экономической оценке трансформатора.

Задача построения трансформатора, отвечающего современным требованиям эксплуатации, а также наиболее простого и дешевого в производстве, решается правильным определением тех воздействий, которым он подвергается в эксплуатации, рациональным выбором его конструкции, правильным выбором размеров и материала отдельных его частей и конструктивных деталей и правильно организованным технологическим процессом его изготовления, учитывающим свойства применяемых материалов и назначение трансформатора. Ряд рекомендаций по этим вопросам дается в главах, посвященных расчету магнитных систем, обмоток и других частей трансформатора.

Расчет трансформатора тесно связан со вторым этапом проектирования — конструированием. На самых первых стадиях расчета необходимо произвести выбор основной конструктивной схемы трансформатора, а также в ходе расчета выбирать конструкции его отдельных частей — магнитной системы, обмоток, изоляционных деталей, отводов и т. д. Поэтому, приступая к работе, расчетчик должен иметь ясное представление о современных конструкциях частей трансформатора, практически возможных пределах их применения, достоинствах и недостатках.

Для облегчения работы расчетчика в тексте некоторых глав приводятся краткие сведения по конструкции

частей трансформатора—остова, обмоток, бака и т. д.— в объеме, минимально необходимом для расчета, и даются рекомендации по выбору этих конструкций.

Отдельные стадии расчета могут чередоваться в той или иной последовательности в зависимости от удобства выполнения этой работы, однако всегда желательно придерживаться такого порядка, который обеспечивает наименьшую затрату времени и требует наименьшего количества повторных пересчетов. Необходимость получения трансформатора с определенными параметрами заставляет производить некоторые исправления на проделанном этапе расчета, если заданные параметры не получаются сразу. Во избежание больших переделок выполненной части расчета рекомендуется всю схему расчета строить так, чтобы заданные параметры P_K , P_X и u_K учитывались уже при выборе исходных данных и определении основных размеров трансформатора и подгонялись к норме на возможно более ранних стадиях расчета. Этим условиям отвечает схема расчета трансформатора, приведенная ниже. Применительно к этой схеме построены все изложение материала и примеры расчетов трансформаторов.

Схема расчета трансформатора

1. Определение основных электрических величин (гл. 3 и 4):
 - а) определение линейных и фазных токов и напряжений обмоток ВН и НН;
 - б) определение испытательных напряжений обмоток;
 - в) определение активной и реактивной составляющих напряжения короткого замыкания.
2. Расчет основных размеров трансформатора (гл. 2, 3 и 4):
 - а) выбор схемы и конструкции магнитной системы;
 - б) выбор марки и толщины листов стали и типа изоляции пластин. Выбор индукции в магнитной системе;
 - в) выбор материала обмоток;
 - г) предварительный выбор конструкций обмоток (гл. 5);
 - д) выбор конструкций и определение размеров основных изоляционных промежутков главной изоляции обмоток;
 - е) предварительный расчет трансформатора и выбор соотношения основных размеров β с учетом заданных значений u_K , P_K и P_X по § 3-4 — 3-7 или только по § 3-7;
 - ж) определение диаметра стержня и высоты обмотки. Предварительный расчет магнитной системы.
3. Расчет обмоток НН и ВН (гл. 5 и 6):
 - а) выбор типа обмоток НН и ВН;
 - б) расчет обмотки НН;
 - в) расчет обмотки ВН.

4. Определение параметров короткого замыкания (гл. 7):
 - а) определение потерь короткого замыкания;
 - б) определение напряжения короткого замыкания;
 - в) определение механических сил в обмотках.
 5. Окончательный расчет магнитной системы. Определение параметров холостого хода (гл. 8):
 - а) определение размеров пакетов и активных сечений стержня и ярма;
 - б) определение массы стержней и ярм и массы стали;
 - в) определение потерь холостого хода;
 - г) определение тока холостого хода.
 6. Тепловой расчет и расчет системы охлаждения (гл. 9):
 - а) поверочный тепловой расчет обмоток;
 - б) расчет системы охлаждения (бака, радиаторов, охладителей).
- Определение габаритных размеров трансформатора;
- в) определение превышений температуры обмоток и масла над воздухом;
 - г) определение массы масла и основных размеров расширителя.
7. Экономический расчет (гл. 1 и 3):
 - а) расчет расхода активных и конструктивных материалов;
 - б) ориентировочный расчет себестоимости и цены трансформатора;
 - в) определение приведенных годовых затрат и оценка экономичности рассчитанного трансформатора.

3-2. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

Расчет трансформатора начинается с определения основных электрических величин — мощности на одну фазу и стержень, номинальных токов на стороне ВН и НН, фазных токов и напряжений.

Мощность одной фазы трансформатора, кВ·А,

$$S_{\phi} = S/m. \quad (3-1)$$

Мощность на одном стержне

$$S' = S/c, \quad (3-2)$$

где c — число активных (несущих обмотки) стержней трансформатора;

S — номинальная мощность трансформатора, кВ·А.

Для трехобмоточного трансформатора под мощностью S следует понимать наибольшее из трех значений номинальной мощности для обмоток ВН, СН и НН.

Номинальный (линейный) ток обмотки ВН, СН и НН трехфазного трансформатора, А, определяется

по формуле

$$I = \frac{S \cdot 10^3}{\sqrt{3} U}, \quad (3-3)$$

где S — мощность трансформатора, кВ·А; для трехобмоточного трансформатора S — мощность соответствующей обмотки ВН, СН или НН;

U — номинальное линейное напряжение соответствующей обмотки, В.

Для расщепленных обмоток S — мощность соответствующей части обмотки. В трансформаторах классов напряжения 35—500 кВ, отвечающих требованиям современных стандартов, расщепление обмотки производится на две части, равные по мощности.

Для однофазного трансформатора номинальный ток, A , определяется по формуле

$$I = S \cdot 10^3 / U. \quad (3-4)$$

Для трехфазного трансформатора фазный ток обмотки одного стержня определяется по формулам:

при соединении обмоток в звезду или зигзаг

$$I_\phi = I; \quad (3-5)$$

при соединении обмоток в треугольник

$$I_\phi = I / \sqrt{3}, \quad (3-6)$$

где номинальный ток I определяется по (3-3).

Фазные напряжения трехфазного трансформатора определяются по формулам:

при соединении в звезду или зигзаг

$$U_\phi = U / \sqrt{3}; \quad (3-7)$$

при соединении в треугольник

$$U_\phi = U, \quad (3-8)$$

где U — номинальное линейное напряжение соответствующей обмотки, В.

При соединении в зигзаг результирующее фазное напряжение образуется геометрическим сложением напряжений двух частей обмотки, находящихся на разных стержнях (рис. 3-1). В силовых трансформаторах общего назначения обе части обмотки на каждом стержне имеют равное число витков. В этом случае фазное напряжение образуется суммой равных напряжений двух частей обмотки,

сдвинутых на 60° . Напряжение одной части обмотки фазы при этом может быть получено из

$$U' = \frac{U_\phi}{2 \cos 30^\circ} = \frac{U_\phi}{\sqrt{3}}.$$

Общее число витков такой обмотки на одном стержне будет определяться не U_ϕ , как при соединении в звезду, а $2U_\phi \sqrt{3}$, т. е. увеличится в 1,155 раза.

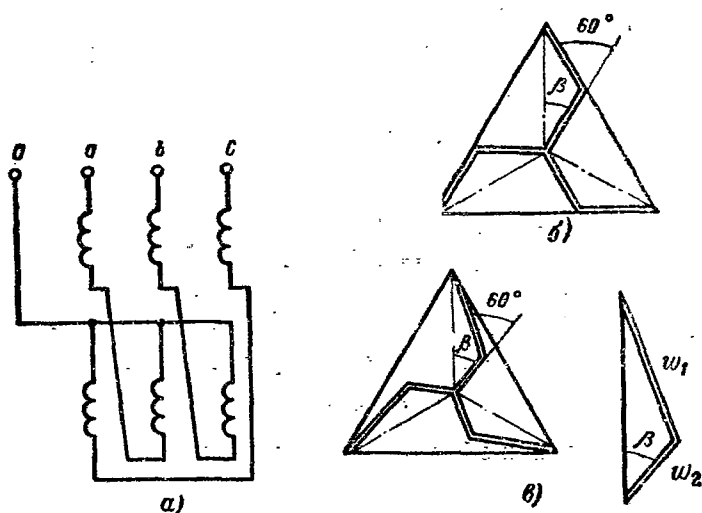


Рис. 3-1. Схема соединения зигзаг.

a — общая схема; $б$ — диаграмма фазных и линейных напряжений при разделении фазных обмоток на две равные части; $в$ — то же, когда обмотки делятся на неравные части.

При соединении в зигзаг обмотка фазы может разделяться на две неравные части. В этом случае может быть получен поворот системы фазных и линейных напряжений схемы на любой угол в зависимости от того, в каком отношении находятся числа витков двух частей обмотки фазы (рис. 3-1, $в$). При заданном в угле β обмотка каждой фазы должна быть разделена в отношении

$$\frac{w_1}{w_1 + w_2} = \frac{2 \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta + \sqrt{3}}.$$

Если

$$w_1 = w_2 \text{ и } \frac{w_1}{w_1 + w_2} = \frac{1}{2},$$

то $\beta = 30^\circ$.

Фазный ток и напряжение однофазного трансформатора равны его номинальным току и напряжению. Ток и напряжение обмотки одного стержня в однофазном трансформаторе зависят от соединения обмоток стержней — последовательного или параллельного. В случае последовательного соединения обмоток двух стержней ток обмотки одного стержня равен номинальному току, а напряжение — половине номинального напряжения. При параллельном соединении обмоток двух стержней ток обмотки одного стержня равен половине номинального тока, а напряжение — номинальному напряжению. В обоих случаях предполагается, что числа витков обмоток обоих стержней равны.

Для определения изоляционных промежутков между обмотками и другими токоведущими частями и заземленными деталями трансформатора существенное значение имеют испытательные напряжения, при которых проверяется электрическая прочность* изоляции трансформатора. Эти испытательные напряжения определяются по табл. 4-1 для каждой обмотки трансформатора по ее классу напряжения.

Потери короткого замыкания, указанные в задании, дают возможность определить активную составляющую напряжения короткого замыкания, %:

$$u_a = \frac{I_{\phi} r_k}{U_{\phi}} 100 \frac{m I_{\phi} \cdot 10^{-3}}{m I_{\phi} \cdot 10^{-3}} = \frac{P_k}{10S}, \quad (3-9)$$

где P_k , Вт; S , кВ·А.

Реактивная составляющая при заданном u_k определяется по формуле

$$u_p = \sqrt{u_k^2 - u_a^2}. \quad (3-10)$$

Расчет основных электрических величин для автотрансформатора имеет некоторые особенности. Типовая или расчетная мощность однофазного автотрансформатора

$$S_{\text{тип}} = U_1 I_1 \cdot 10^{-3} = U_2 I_2 \cdot 10^{-3} \quad (3-11)$$

может быть определена по заданной проходной мощности $S_{\text{прох}}$ и номинальным напряжениям U и U' по формулам:

* Здесь и далее электрическая прочность понимается как способность изоляции трансформатора и его частей выдерживать без повреждений те воздействия электрического напряжения, которые возникают при проведении испытаний, установленных нормативными документами (ГОСТ, технические условия), и в эксплуатации.

для повышающего автотрансформатора (рис. 3-2)

$$S_{\text{тип}} = S_{\text{прох}} \frac{U' - U}{U'} = k_{\text{в}} S_{\text{прох}}; \quad (3-12)$$

для понижающего автотрансформатора (рис. 3-3)

$$S_{\text{тип}} = S_{\text{прох}} \frac{U - U'}{U} = k_{\text{в}} S_{\text{прох}}.$$

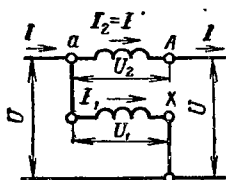


Рис. 3-2. Схема соединения обмоток однофазного двухобмоточного повышающего автотрансформатора.

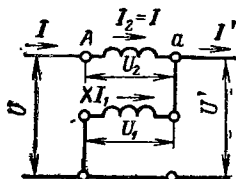


Рис. 3-3. Схема соединения обмоток однофазного двухобмоточного понижающего автотрансформатора.

Коэффициент $k_{\text{в}} = (U' - U)/U'$ для повышающего или $k_{\text{в}} = (U - U')/U$ для понижающего автотрансформатора, показывающий, какую долю составляет типовая (расчетная) мощность $S_{\text{тип}}$ от проходной мощности $S_{\text{прох}}$, иногда называют «коэффициентом выгодности» автотрансформатора ($k_{\text{в}} < 1$).

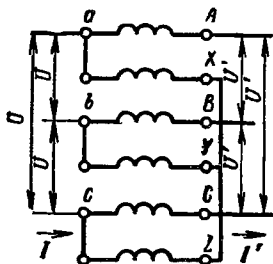


Рис. 3-4. Схема соединения обмоток трехфазного двухобмоточного повышающего автотрансформатора.

Для трехфазного автотрансформатора (рис. 3-4) с обмотками, соединенными в звезду, под U и U' в (3-12) следует понимать линейные напряжения. Соединение обмоток в треугольник для силовых автотрансформаторов обычно не применяется.

Коэффициент $k_{\text{в}}$ всегда меньше единицы и $S_{\text{тип}} < S_{\text{прох}}$, т. е. автотрансформаторная схема требует меньшей расчетной мощности и, следовательно, меньшего расхода материалов, а также обладает более высоким к. п. д., чем трансформаторная. Применение авто-

трансформаторная схема требует меньшей расчетной мощности и, следовательно, меньшего расхода материалов, а также обладает более высоким к. п. д., чем трансформаторная. Применение авто-

трансформаторов в этом отношении тем выгоднее, чем ближе отношение U'/U к единице, т. е. чем меньше изменяется напряжение сети при помощи автотрансформатора.

Номинальные линейные токи для трехфазных и однофазных автотрансформаторов рассчитываются, так же как и для трансформаторов, по (3-3) и (3-4). Расчет токов отдельных обмоток, А, со схемами по рис. 3-2 и 3-3 производится по формулам:

для повышающего однофазного автотрансформатора (рис. 3-2)

$$I_2 = I'; \quad I_1 = I - I_2 = I - I';$$

для понижающего однофазного автотрансформатора (рис. 3-3)

$$I_2 = I; \quad I_1 = I - I_2 = I' - I.$$

Для трехфазного автотрансформатора с соединением обмоток в звезду токи обмоток находятся также по этим формулам. В том и другом случае I и I' — номинальные линейные токи автотрансформатора, найденные по (3-3) и (3-4).

Напряжения отдельных обмоток U_1 и U_2 , В, для однофазного автотрансформатора находятся по формулам:

для повышающего автотрансформатора (рис. 3-2)

$$U_1 = U, \quad U_2 = U' - U;$$

для понижающего автотрансформатора (рис. 3-3)

$$U_1 = U', \quad U_2 = U - U'.$$

Для трехфазного автотрансформатора с соединением обмоток в звезду под U и U' в этих формулах следует понимать фазные напряжения автотрансформатора:

$$U = U_{\text{л}}/\sqrt{3} \text{ и } U' = U'_{\text{л}}/\sqrt{3},$$

где $U_{\text{л}}$ и $U'_{\text{л}}$ — номинальные линейные напряжения автотрансформатора по заданию.

Напряжение короткого замыкания $u_{\text{к}}$ для автотрансформатора обычно задается как сетевое $u_{\text{к.с}}$, т. е. относительно большего из двух сетевых напряжений U и U' .

При расчете основных размеров автотрансформатора необходимо знать расчетное $u_{к.р.}$, т. е. отнесенное к напряжению одной из обмоток U_1 или U_2 . Для понижающего и повышающего автотрансформаторов $u_{к.р.}$ может быть найдено по формуле

$$u_{к.р.} = u_{к.с.}/k_B.$$

После определения расчетной мощности, токов и напряжений обмоток и расчетного напряжения короткого замыкания между обмотками ВН и СН расчет автотрансформатора производится по этим данным так же, как и обычного трансформатора.

Пример. Рассчитать основные электрические величины для понижающего трехфазного трехобмоточного автотрансформатора с автотрансформаторной связью обмоток ВН и СН и трансформаторной связью обмоток ВН и НН, СН и НН по рис. 2-10, б.

Проходная мощность $S_{\text{прох}} = 100\,000$ кВ·А, мощности обмоток ВН и СН при автотрансформаторной связи $S_{\text{прох}}$, мощность обмотки НН $0,5 S_{\text{прох}}$. Номинальное напряжение: ВН 231 кВ, СН 121 кВ $\pm 8 \times 1,5\%$; НН 38,5 кВ. Схемы соединения обмоток: ВН и СН — У, НН — Д. Напряжения короткого замыкания $u_{к.с.}$, приведенные к проходной мощности и отнесенные к сетевым напряжениям: ВН — СН 11%; ВН — НН 31%; СН — НН 19%.

Коэффициент выгодности

$$k_B = \frac{U_{л} - U'_{л}}{U_{л}} = \frac{231 - 121}{231} = 0,476.$$

Типовая мощность $S_{\text{тип}} = k_B S_{\text{прох}} = 0,476 \cdot 100\,000 = 47\,600$ кВ·А; мощность обмотки НН $S_{\text{НН}} = 50\,000$ кВ·А. Расчетная мощность обмотки одного стержня для обмотки ВН и СН

$$S' = \frac{S_{\text{тип}}}{c} = \frac{47\,600}{3} = 15\,867 \text{ кВ·А};$$

для обмотки НН

$$S' = \frac{0,5 S_{\text{прох}}}{c} = \frac{0,5 \cdot 100\,000}{3} = 16\,667 \text{ кВ·А}.$$

Линейные токи

$$I = \frac{S_{\text{прох}} \cdot 10^3}{\sqrt{3} U} = \frac{100\,000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 231\,000} = 250 \text{ А};$$

$$I' = \frac{S_{\text{прох}} \cdot 10^3}{\sqrt{3} U'} = \frac{100\,000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 121\,000} = 480 \text{ А};$$

для обмотки НН

$$I_{лз} = \frac{0,5 S_{НН} \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_{НН}} = \frac{50\,000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 38\,500} = 750 \text{ А.}$$

Токи обмоток

$$I_2 = I = 250 \text{ А}; I_I = I' - I = 480 - 250 = 230 \text{ А};$$

$$I_3 = \frac{I_{лз}}{\sqrt{3}} = 750 / \sqrt{3} = 432 \text{ А.}$$

Фазные напряжения

$$U = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}} = \frac{231\,000}{\sqrt{3}} = 133\,000 \text{ В};$$

$$U' = \frac{U'_л}{\sqrt{3}} = \frac{121\,000}{\sqrt{3}} = 69\,700 \text{ В.}$$

Напряжения обмоток

$$U_I = U' = 69\,700 \text{ В}; U_2 = U - U' = 133\,000 - 69\,700 = 63\,300 \text{ В};$$

$$U_3 = U_{НН} = 38\,500 \text{ В.}$$

Расчетное напряжение короткого замыкания между обмотками ВН и СН

$$u_{к.р} = \frac{u_{к.с}}{k_B} = \frac{11}{0,5} = 22\%.$$

Напряжения короткого замыкания между обмотками ВН и НН, СН и НН, имеющими трансформаторную связь, не пересчитываются, но при реально возможной нагрузке на обмотках ВН—НН или СН—НН, равной $0,5 S_{\text{прох}}$, будут равны: для ВН—НН $0,5 \cdot 31 = 15,5\%$ и для СН—НН $0,5 \cdot 19 = 9,5\%$.

3.3. ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРЫ ТРАНСФОРМАТОРА

Магнитная система трансформатора является основой его конструкции. Выбор основных размеров магнитной системы совместно с основными размерами обмоток определяет главные размеры активной части и всего трансформатора. Рассмотрим двухобмоточный трансформатор с плоской магнитной системой стержневого типа со стержнями, имеющими сечение в форме симметричной ступенчатой фигуры, вписанной в окружность и с концентрическим расположением обмоток.

Магнитная система такого трехфазного трансформатора с обмотками схематически изображена на рис. 3-5.

Диаметр d окружности, в которую вписано ступенчатое сечение стержня, является одним из его основных размеров. Вторым основным размером трансформатора является осевой размер l (высота) его обмоток. Обычно обе обмотки трансформатора имеют одинаковую высо-

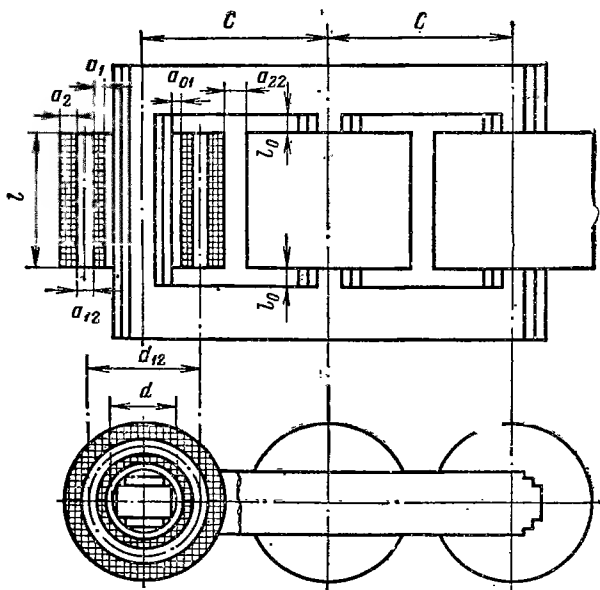


Рис. 3-5. Основные размеры трансформатора.

ту. В случае различия в высоте за размер l принимают их среднее арифметическое значение. Третьим основным размером трансформатора является средний диаметр витка двух обмоток, или диаметр осевого канала между обмотками d_{12} , связывающий диаметр стержня с радиальными размерами обмоток a_1 и a_2 и осевого канала между ними a_{12} .

Если эти три размера выбраны или известны, то остальные размеры, определяющие форму и объем магнитной системы и обмоток, например высота стержня l_c , расстояние между осями соседних стержней C и т. д., могут быть найдены, если известны допустимые изоля-

ционные расстояния от обмоток ВН до заземленных частей и до других обмоток (a_{12}, a_{22}, l_0).

Два основных размера, относящихся к обмоткам d_{12} и l , могут быть связаны отношением средней длины окружности канала между обмотками πd_{12} к высоте обмотки l :

$$\beta = \pi d_{12} / l. \quad (3-13)$$

Приблизленно произведение πd_{12} можно приравнять к средней длине витка двух обмоток $\pi d_{12} \approx l_B$, или $l_B / l = \beta$.

Величина β определяет соотношение между диаметром и высотой обмотки. Значение β может варьироваться в широких пределах и практически изменяется в масляных и сухих трансформаторах существующих серий в пределах от 1,0 до 3,5. При этом меньшим значениям β соответствуют трансформаторы, относительно узкие и высокие, большим — широкие и низкие. Это наглядно показано на рис. 3-6, где представлены два трансформатора одинаковой мощности, одного класса напряжения, рассчитанных при одинаковых исходных данных (B_c, k_c), с одинаковыми параметрами короткого замыкания (P_K и u_K) для значений $\beta = 1,2$ и $\beta = 3,5$.

Различным значениям β соответствуют и разные соотношения между массами активных материалов — стали магнитной системы и металла обмоток. Меньшим значениям β соответствует меньшая масса стали и большая масса металла обмоток. С увеличением β масса стали увеличивается, масса металла обмоток уменьшается. Таким образом, выбор того или иного β существенно влияет не только на соотношение размеров трансформатора, но и на соотношение масс активных и других материалов, а следовательно, и на стоимость трансформатора.

Вместе с этим изменение β сказывается так же и на технических параметрах трансформатора: потерях и токе холостого хода, механической прочности и нагревостойкости обмоток, габаритных размерах.

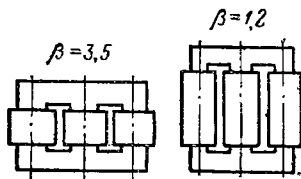


Рис. 3-6. Соотношение размеров двух трансформаторов с разными значениями β .

Для вывода формулы, связывающей диаметр стержня трансформатора с его мощностью, воспользуемся следующими соотношениями, известными из теории трансформаторов.

Мощность трансформатора на один стержень, кВ·А,

$$S' = UI \cdot 10^{-3}. \quad (3-14)$$

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %,

$$u_p = \frac{7,9 f l w \pi d_{12} a_p k_p}{u_B l} 10^{-6},$$

или

$$u_p = \frac{7,9 f l w \beta a_p k_p}{u_B} 10^{-6}, \quad (3-15)$$

где

$$\beta = \frac{\pi d_{12}}{l} \text{ и } a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3};$$

k_p — коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному (коэффициент Роговского).

Одновременно заметим, что э. д. с. витка трансформатора, В, может быть записана в виде

$$u_B = 4,44 f B_c \Pi_c \cdot 10^{-4}, \quad (3-16)$$

где B_c — максимальная индукция в стержне¹, Т;

$\Pi_c = k_c \pi d^2 / 4$ — активное сечение стержня¹, см²;

k_c — коэффициент заполнения площади круга сталью согласно § 2-3.

Заменяя в выражении (3-14) напряжение обмотки U произведением $u_B w$ и подставляя значение тока обмотки I , определенное из выражения (3-15), и значение u_B по выражению (3-16), получим:

$$S' = \frac{u_B w u_p u_B \cdot 10^3}{7,9 f w \beta a_p k_p} = \frac{(4,44 f B_c \pi d^2 k_c \cdot 10^{-4}) u_p \cdot 10^3}{7,9 f \beta a_p k_p \cdot 4}.$$

Проведя сокращения и решив это уравнение относительно d , получим окончательно:

$$d = 16,0 \sqrt[4]{\frac{S' \beta a_p k_p}{f u_p B_c^2 k_c^2}}, \quad (3-17)$$

¹ Здесь магнитная индукция, Т, линейные размеры магнитной системы, см, активные сечения, см².

Формула (3-17) позволяет определить главный размер трансформатора — диаметр стержня его магнитной системы.

Величины, входящие в подкоренное выражение формулы (3-17), впервые предложенной Г. Н. Петровым, можно подразделить на три категории: 1) величины, заданные при расчете, — мощность обмоток на одном стержне трансформатора S' (кВ·А), частота сети f (Гц) и реактивная составляющая напряжения короткого замыкания u_p (%); 2) величины, выбираемые при расчете, — отношение длины окружности канала между обмотками (средней длины витка двух обмоток) к высоте обмотки β , максимальная индукция в стержне B_c (Т), и коэффициент заполнения активной сталью площади круга, описанного около сечения стержня k_c ; 3) величины, определяемые в ходе последующего расчета, — приведенная ширина канала рассеяния a_p (см) и коэффициент приведения идеализированного поля рассеяния к реальному k_p (коэффициент Роговского).

Таким образом, определение диаметра стержня по формуле (3-17) связано с выбором некоторых исходных данных (β , B_c , k_c) и с предварительным определением данных обмоток трансформатора, получаемых обычно после завершения расчета обмоток a_p и k_p . Выбор исходных данных (β , B_c , k_c) может быть сделан на основании исследования ряда вариантов (см. § 3-5—3-7) или путем использования заранее разработанных рекомендаций (см. § 3-7). Для определения a_p и k_p должны применяться приближенные методы.

3-4. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

Основы обобщенного метода

Теория и практика проектирования силовых трансформаторов позволили установить, что выбор исходных данных расчета — соотношения основных размеров трансформатора β , марки электротехнической стали и металла обмоток, электромагнитных нагрузок активных материалов (индукции в магнитной системе и плотности тока в обмотках), конструктивных форм магнитной системы и обмоток, принципиальной конструкции и материала изоляции и других оказывает существенное влияние на результаты расчета трансформатора — массы его основных материалов, параметры холостого хода

и короткого замыкания и стоимость трансформатора. Поэтому выбор исходных данных должен производиться с учетом параметров трансформатора, которые необходимо получить или которые являются оптимальными для рассчитываемого трансформатора.

Таким образом, в начале расчета приходится решать две задачи — установление оптимальных параметров холостого хода и короткого замыкания трансформатора и выбор исходных данных расчета, обеспечивающих получение этих параметров при оптимальной стоимости трансформатора. При расчете новых серий трансформаторов обе эти задачи решаются совместно в процессе предварительного расчета и для каждого типа трансформатора устанавливаются оптимальные размеры при оптимальных параметрах, а именно потерях холостого хода и короткого замыкания, которые должны обеспечивать наименьшую стоимость трансформации энергии, т. е. наиболее экономичную работу трансформатора в эксплуатации с учетом стоимости трансформатора, его установки и всех эксплуатационных затрат, включая потери энергии за определенный промежуток времени.

В большинстве случаев при проектировании новых серий выбор активных материалов и конструктивных форм магнитной системы, обмоток и изоляции производится по соображениям, независимым от расчетных данных трансформаторов серии, чем существенно упрощается задача расчета. В некоторых случаях при расчете серии производится сравнение двух или более различных решений, например плоской и пространственной магнитных систем, медных и алюминиевых обмоток и т. д. Существенно упрощается задача при расчете отдельного трансформатора известной серии с заданными параметрами холостого хода и короткого замыкания (см. § 3-5).

При проектировании отдельного трансформатора наиболее простым, на первый взгляд, является такой метод, когда задаются несколькими вариантами исходных данных и затем после выполнения полного расчета с раскладкой обмоток и расчетом параметров выбирают наилучший из вариантов. При кажущейся простоте этот метод является чрезвычайно трудоемким и, заставляя ограничивать число вариантов, часто не дает возможности получить действительно оптимальное решение. Применение средств вычислительной техники хотя

и позволяет вести полный расчет трансформатора на ЭВМ, но ввиду сложности программ и необходимости использования большого машинного времени применяется только для проектирования новых серий трансформаторов.

В целях экономии расчетной работы и ускорения проектирования желательно иметь такой метод, который позволил бы вести предварительный расчет в обобщенном виде без углубления в мелкие детали, был достаточно простым и быстрым, обладал достаточной точностью и позволял оценивать результаты с разных точек зрения, в том числе и с экономической. Такой метод должен давать не одно решение, а полную картину изменения масс активных материалов, эксплуатационных и экономических параметров трансформатора при изменении любых исходных данных и допускать выбор оптимального решения путем экономической оценки рассчитанных вариантов с учетом таких факторов как принципиальная конструкция магнитной системы и обмоток, та или иная марка электротехнической стали, медные или алюминиевые обмотки, требования стандартов и др.

Обобщенный метод расчета мыслится как метод определения основных данных трансформатора — основных размеров магнитной системы и обмоток, масс активных материалов, стоимости трансформатора, параметров холостого хода и короткого замыкания и некоторых других показателей на предварительной стадии расчета. В результате применения этого метода должна быть получена возможность выбора оптимального варианта, иногда нескольких вариантов, для дальнейшей детальной расчетной и конструктивной разработки. Для того чтобы обобщенный метод расчета силовых трансформаторов давал достаточно точные результаты, он должен быть основан на положениях общей теории трансформаторов и теории проектирования трансформаторов. В любом таком методе неизбежно использование некоторых допущений и некоторых величин, определяемых или оцениваемых приближенно. Число таких величин должно быть минимальным, а сами эти величины должны быть такими, чтобы при существенных изменениях в исходных данных расчета они изменялись бы незначительно и чтобы реально возможная ошибка в их приближенном определении в минимальной степени влияла на результат расчета.

В качестве независимых переменных могут быть выбраны различные величины, например отношение основных размеров β , диаметр стержня магнитной системы d , плотность тока в обмотках Δ , радиальные размеры обмоток и др. Для лучшей сходимости результатов расчета желательно выбрать такие независимые переменные, изменение которых оказывает наибольшее влияние на другие данные трансформатора и которые дают возможность более ясного и наглядного представления о всем облике трансформатора. В наибольшей степени этим требованиям отвечают диаметр стержня магнитной системы d и отношение основных размеров обмоток β .

Обобщенный метод расчета трансформатора должен дать возможность найти достаточно простые и точные математические связи между заданными величинами (мощность трансформатора, частота, класс напряжения, изоляционные расстояния в главной изоляции), величинами, выбираемыми в начале расчета (индукция в магнитной системе, коэффициент заполнения сталью, соотношение основных размеров), основными размерами и стоимостью трансформатора, а также его эксплуатационными параметрами, т. е. параметрами холостого хода и короткого замыкания. Желательно, чтобы обобщенный метод, отвечая всем вышеизложенным требованиям, давал возможность наглядного графического представления изменения размеров, масс активных материалов и основных параметров трансформатора в зависимости от избранных независимых переменных.

Метод должен быть достаточно универсальным для обобщенного расчета силовых трансформаторов в широком диапазоне мощностей — масляных и сухих, трехфазных и однофазных, двухобмоточных и трехобмоточных, с плоскими и пространственными магнитными системами из холоднокатаной или горячекатаной электротехнической стали любой марки, с обмотками из медного или алюминиевого провода.

Следует иметь в виду, что любой обобщенный метод расчета является приближенным и что при полном расчете магнитной системы и обмоток неизбежны некоторые отклонения от первоначально намеченных данных, связанные с необходимостью выбирать диаметр стержня из нормализованного ряда, округлять число витков до ближайшего целого числа, считаться с существующим сортаментом обмоточных проводов, наличием стандарт-

ных деталей и т. д. Применение обобщенного метода, однако, существенно ограничивая область возможных решений, всегда позволяет найти оптимальное решение задачи при минимальных числе рассматриваемых вариантов и времени, необходимом на их исследование.

При практическом использовании метод должен допускать возможность учета требуемых параметров трансформатора путем включения их в прямом или скрытом виде в исходные данные или в основные расчетные формулы так, чтобы в результате расчета был получен трансформатор с теми именно свойствами или параметрами, которые требуются по заданию. Метод должен давать возможность исследования влияния тех или иных исходных данных или параметров на массы активных материалов, параметры холостого хода и короткого замыкания, размеры трансформатора и другие его данные.

Одним из примеров наиболее простого обобщенного метода расчета трансформаторов является применение общеизвестного закона, связывающего мощность трансформатора с его линейными размерами¹. Рассмотрим серию, т. е. ряд типов трансформаторов определенного назначения и конструкции, с одинаковым числом фаз, одной частоты, с одинаковым числом обмоток, одного класса напряжения, с одним видом регулирования напряжения и одним видом охлаждения, различных мощностей, нарастающих по определенной шкале в ограниченном диапазоне.

Предположим, что в пределах всей серии соотношения между отдельными размерами трансформаторов сохраняются постоянными, т. е. что магнитные системы и обмотки всех трансформаторов данной серии представляют собой геометрически подобные фигуры. Далее предположим, что электромагнитные нагрузки активных материалов — индукция в магнитной системе и плотность тока в обмотках трансформатора в пределах всей серии также остаются неизменными. Для ряда трансформаторов, целенаправленно спроектированных и отвечающих вышеупомянутым условиям, эти допущения являются вполне правомерными.

¹ Некоторые положения этого закона установлены М. О. Доливо-Добровольским; полная формулировка закона принадлежит М. Видмару.

Обращаясь к общей теории трансформаторов, можно записать:

мощность обмоток одного стержня трансформатора

$$S' = UI,$$

где U — напряжение обмотки стержня;

I — ток обмотки стержня.

Заменяя $U = u_{\text{в}} \omega$ и $I = \Delta \Pi$, где $u_{\text{в}}$ — напряжение одного витка; ω — число витков обмотки стержня; Δ — плотность тока в обмотках и Π — сечение одного витка обмотки, получаем $S' = u_{\text{в}} \omega \Delta \Pi$.

Далее, замечая, что $u_{\text{в}} = 4,44 f B_c \Pi_c$, где магнитная индукция в стержне B_c , Т, активное сечение стержня, м²,

$$\Pi_c = \pi d^2 k_c / 4,$$

находим:

$$S' = (1,11 \pi f k_c) (B_c \Delta) (d^2 \omega \Pi). \quad (3-18)$$

Первая и вторая скобки правой части этого выражения для данной серии могут быть заменены постоянным коэффициентом.

Тогда мощность трансформатора, имеющего c активных, т. е. несущих обмотки стержней:

$$S = c S' = k (d^2 \omega \Pi). \quad (3-19)$$

Произведение $\omega \Pi$ представляет собой площадь сечения всех витков обмотки, т. е. величину, пропорциональную квадрату линейного размера трансформатора. Таким образом, все выражение, стоящее в скобках ($d^2 \omega \Pi$), поскольку соотношение линейных размеров остается в пределах серии неизменным, оказывается пропорциональным любому линейному размеру в четвертой степени, или

$$S \sim l^4. \quad (3-20)$$

Отсюда следует, что линейные размеры трансформатора возрастают пропорционально корню четвертой степени из мощности:

$$l \sim S^{1/4}. \quad (3-21)$$

Электродвижущая сила одного витка обмотки $u_{\text{в}}$ пропорциональна $d^2 \sim l^2$, или

$$u_{\text{в}} \sim S^{1/2}, \quad (3-22)$$

т. е. возрастает с ростом мощности трансформатора.

Масса активных материалов трансформатора (стали $G_{ст}$ и металла обмоток G_o) возрастает пропорционально кубу его линейных размеров, или

$$G \sim l^3 \sim S^{3/4}. \quad (3-23)$$

Расход активных материалов на единицу мощности трансформатора изменяется пропорционально

$$g = \frac{G}{S} \sim \frac{S^{3/4}}{S} = \frac{1}{S^{1/4}}, \quad (3-24)$$

т. е. падает с ростом мощности. Потери в активных материалах стали магнитной системы и металле обмоток ΣP при сохранении неизменных электромагнитных нагрузок пропорциональны их массам или объемам и, следовательно, полные потери

$$\Sigma P \sim S^{3/4}; \quad (3-25)$$

потери на единицу мощности

$$p = \frac{\Sigma P}{S} \sim \frac{1}{S^{1/4}}, \quad (3-26)$$

т. е. потери на единицу мощности (1 кВ·А) падают вместе с ростом мощности трансформатора, а к. п. д. трансформатора соответственно возрастает.

Внешняя, охлаждаемая воздухом поверхность трансформатора естественно растет пропорционально квадрату линейных размеров $\Pi_o \sim l^2 \sim S^{1/2}$, а потери q , отнесенные к единице поверхности, также возрастают:

$$q \sim \frac{\Sigma P}{\Pi_o} \sim \frac{S^{3/4}}{S^{1/2}} = S^{1/4}. \quad (3-27)$$

Выведенные выше пропорциональные зависимости (3-24) и (3-26) показывают, что увеличение мощности трансформатора в одной единице является экономически выгодным потому, что приводит к уменьшению удельного расхода материала на 1 кВ·А мощности и к повышению к. п. д. В то же время из выражения (3-27) следует, что естественный рост охлаждаемой поверхности трансформатора отстает от роста его потерь и, следовательно, с ростом мощности трансформатора усложняется решение проблемы его охлаждения (§ 9-2).

С ростом мощности трансформатора возрастают его масса и внешние размеры (габариты), что при мощностях современных трансформаторов, достигающих сотен тысяч киловольт-ампер, приводит к затруднениям при перевозке трансформаторов по железным дорогам. Для упрощения решения этого вопроса часто прибегают к расщеплению мощной трехфазной трансформаторной установки на отдельные однофазные трансформаторы, а в некоторых случаях и к дальнейшему расщеплению обмотки однофазных трансформаторов между несколькими стержнями (§ 2-1). Такое расщепление является невыгодным с точки зрения удельного расхода материалов и к. п. д.

Допустим, что трехфазный трансформатор мощностью S нужно заменить тремя однофазными той же общей мощностью. В трехфазном трансформаторе с магнитной системой по схеме рис. 2-6, б мощность на один стержень $S_3 = S/3$. В однофазном двухстержневом трансформаторе с магнитной системой по схеме рис. 2-6, а $S'_1 = S/2 \cdot 3 = S/6$. Отношение удельного расхода активных материалов для двух рассматриваемых случаев составит по (3-24)

$$\frac{g_1}{g_3} = \left(\frac{S_3}{S'_1} \right)^{1/4} = (2)^{1/4} = 1,19,$$

т. е. удельный расход активных материалов при замене трехфазного трансформатора тремя однофазными двухстержневыми возрастает на 19%. В таком же отношении возрастают и полные потери. Расщепление мощности однофазного трансформатора между тремя стержнями, например по схеме на рис. 2-6, в, приводит принципиально к тем же результатам. Замена трех стержней трехфазной магнитной системы девятью стержнями трех однофазных систем приводит к увеличению удельного расхода материалов в отношении $\left(\frac{9}{3} \right)^{1/4} = 1,32$.

Относительная невыгодность расщепления мощности заставляет трансформаторостроителей в СССР и за границей искать новые пути создания трехфазных трансформаторов большой мощности, допускающих по массе и габаритам перевозку по железным дорогам, взамен выпускавшихся ранее однофазных трансформаторов.

В реальных современных сериях силовых трансформаторов предположение геометрического подобия фигур магнитных систем и обмоток практически подтверждается в пределах отдельных серий и несколько нарушается при рассмотрении различных серий, взятых в другом диапазоне шкалы мощностей и отличающихся классом напряжения или системой охлаждения. Выведенные выше соотношения тем не менее оказываются достаточно точными как для получения некоторых обобщенных выводов о законах изменения размеров, масс активных

материалов, потерь и некоторых удельных соотношений в трансформаторах, так и для некоторых приближенных пересчетов. Это наглядно показано в табл. 3-1, где приведены некоторые данные отдельных типов трансформаторов различных мощностей.

Таким образом, простейший обобщенный метод расчета, основанный на положениях общей теории трансформаторов и некоторых допущениях, позволил провести исследование и сделать важные выводы о связи роста мощности трансформатора с изменением ряда его параметров.

Выпуск силовых трансформаторов заводами и общее число трансформаторов, установленных в сетях, принято оценивать по их общей суммарной мощности. При необходимости оценить общий расход материалов на изготовление этих трансформаторов следует учесть не только их суммарную мощность, но также и удельный расход материалов. Представление о реальном расходе материалов на производство энергетических трансформаторов общего назначения дает табл. 3-2, где учтены как общий выпуск трансформаторов различных мощ-

Таблица 3-1

Изменение диаметра стержня, массы активных материалов и потерь трансформатора, отнесенных к его мощности для современных трехфазных двухобмоточных масляных трансформаторов с медными обмотками

Параметры	Мощность, кВ·А			
	100	1600	25 000	400 000
Класс напряжения, кВ .	10	35	110	220
Регулирование напряжения	ПБВ	ПБВ	РПН	ПБВ
Диаметр стержня, см .	14	28	56	118
Расход металла на обмотки, кг/(кВ·А) . .	0,96	0,337	0,292	0,107
Расход стали на магнитную систему, кг/(кВ×А)	2,14	1,24	0,766	0,312
Потери короткого замыкания, Вт/(кВ·А) . . .	19,7	11,25	4,80	2,20
Потери холостого хода, Вт/(кВ·А)	3,10	1,94	1,16	0,700

**Распределение выпуска трансформаторов и расхода
активных металлов в процентах от общего объема
для силовых энергетических трансформаторов**

Габа- рит	Мощность, кВ·А	ВН, кВ	Общий выпуск по мощности, %	Расход металла, %	
				Сталь	Металл обмоток
I	25—100	10	4,1	10,8	13,3
II	160—630	10	13,7	22,2	23,0
III	1000—6300	35	10,2	11,4	10,0
IV	10 000—80 000	110—500	72,0	55,6	53,7
			100	100	100

ностей по плану 1970 г., так и удельный расход материалов.

Из данных табл. 3-2 следует, что до 45% активных материалов вкладывается в силовые трансформаторы общего назначения первых трех габаритов от 25 до 6300 кВ·А, суммарная мощность которых составляет 28% общего выпуска. В тех же трансформаторах возникает до 45% всех потерь в трансформаторах энергосистем. Если учесть также трансформаторы специального назначения — для электропечных, выпрямительных и других установок, то общий расход материалов и общая сумма потерь в трансформаторах первых трех габаритов возрастет до 50%. При этом общая стоимость этих потерь составит более 50% стоимости потерь всех трансформаторов сети потому, что цена 1 кВт потерь возрастает по мере удаления трансформатора от электростанции, питающей сеть. Вследствие этого проектирование массовых серий трансформаторов первых трех габаритов мощностью до 6300 кВ·А и экономное расходование в них активных и других материалов заслуживают особого внимания проектировщиков.

3-5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОТДЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПО ОБОБЩЕННОМУ МЕТОДУ

Задача проектирования трансформатора может быть поставлена различным образом. Если необходимо рассчитать трансформатор применительно к требованиям стандарта или трансформатор, являющийся промежуточным типом в уже известной серии, то для такого

трансформатора можно считать заданными не только мощность, частоту, число фаз и напряжения обмоток, но также и параметры холостого хода и короткого замыкания. Это налагает определенные ограничения на проект трансформатора, что, впрочем, не затрудняет, а облегчает задачу проектировщика потому, что сокращает число необходимых расчетных вариантов.

Так, может быть поставлена задача при необходимости перепроектировать один из трансформаторов серии, чтобы привести его в соответствие с требованиями нового стандарта или при замене одного из активных материалов другим, например одной марки стали другой маркой или медных обмоток алюминиевыми.

При проектировании новой серии трансформаторов задача осложняется тем, что при расчете каждого трансформатора необходимо установить не только его оптимальные размеры, но также и параметры холостого хода и короткого замыкания. Решение этой задачи, достаточно сложной и требующей выполнения большого числа расчетных вариантов, может быть получено путем проведения ряда расчетов каждого трансформатора серии с определенными ограничениями его параметров и варьированием этих ограничений. Методика проектирования новых серий подробно рассмотрена в гл. 12. При этом проектирование отдельного трансформатора становится одним из элементов проектирования трансформатора новой серии.

При проектировании отдельного трансформатора должны быть заданы значения ряда параметров и некоторые условия. К ним относятся: мощность трансформатора, частота, число фаз, напряжения обмоток, характер нагрузки, место установки, система охлаждения, некоторые требования стандарта, а также параметры холостого хода и короткого замыкания. Некоторые данные должны быть выбраны до начала расчета, а именно: принципиальная конструкция магнитной системы, материал магнитной системы (марка электротехнической стали), способ изоляции пластин и индукция в стержнях и ярмах, принципиальная конструкция обмоток, материал обмоток (медный или алюминиевый провод), конструкция изоляции и размеры изоляционных промежутков изоляции обмоток.

Все выбираемые величины и данные могут быть определены на основании опыта проектирования и вы-

пуска трансформаторов существующих серий с учетом применения новых улучшенных материалов, использования результатов новых исследований в области трансформаторостроения, применения новых конструкций магнитных систем, новых и улучшенных конструкций обмоток и их изоляции, новых систем охлаждения и новых прогрессивных технологических процессов в производстве трансформаторов. Все выбираемые и заданные величины составляют при этом исходные данные расчета трансформатора.

При проектировании отдельного трансформатора применение обобщенного метода представляет интерес прежде всего для расчета трансформатора наиболее распространенной конструкции, т. е. для трехфазного силового двухобмоточного трансформатора с плоской несимметричной магнитной системой, собираемой из пластин холоднокатаной или горячекатаной электротехнической стали по рис. 3-5, с катушечными или многослойными обмотками из медного или алюминиевого обмоточного провода и с главной изоляцией в виде масляных или воздушных каналов с барьерами из твердого диэлектрика. Полагая задачей, решаемой этим методом, получение трансформатора с определенным напряжением короткого замыкания и определенными уровнями потерь и тока холостого хода и потерь короткого замыкания, т. е. трансформатора, входящего в известную серию или отвечающего требованиям ГОСТ, в основу метода положим выражение (3-17), связывающее основной размер трансформатора d с основными исходными данными расчета. При этом мощность трансформатора на один стержень S' (кВ·А), частота сети f (Гц) и реактивная составляющая напряжения короткого замыкания u_p (%) считаются заданными.

Индукция в стержне B_c обычно выбирается применительно к выбранной марке стали и установившейся технологии производства (наличие или отсутствие отжига стали, технология заготовки пластин и сборки магнитных систем). В пределах данной серии индукция B_c обычно остается практически неизменной. Таким образом, на первом этапе исследования можно считать $B_c = \text{const}$.

В дальнейшем (§ 11-1) вопрос о влиянии выбора B_c на массы активных материалов и параметры трансформатора будет исследован особо.

Коэффициент заполнения сечения стержня сталью k_c определяется числом ступеней в сечении и принятым способом прессовки стержня при ступенчатой его форме или способом расположения пластин (радиальное, эвольвентное) при цилиндрической форме, а также качеством отделки стали (§ 2-3). Для трансформатора каждого типа конструкция, материал и технология изготовления магнитной системы, а следовательно, и k_c обычно выбираются до начала расчета на основании имеющегося опыта и задачи, поставленной при проектировании трансформатора. При этом всегда стремятся получить наибольшее возможное значение k_c . Поэтому при исследовании влияния основных исходных данных на параметры трансформатора k_c для этого трансформатора можно считать величиной постоянной. При расчете серии k_c будет несколько изменяться от трансформатора одного типа к другому, сохраняясь постоянным во всех вариантах для каждого типа. В дальнейшем (§ 11-2) вопрос о влиянии выбранного k_c на массы активных материалов и параметры трансформатора будет исследован более подробно.

В отличие от B_c и k_c соотношение основных размеров β при расчете трансформатора может варьироваться в очень широких пределах. Оптимальное значение β зависит при этом как от других исходных данных расчета, так и от поставленной задачи — получения определенных параметров, минимальной стоимости трансформатора, наиболее экономичной его работы в эксплуатации и т. д.

При расчете основных размеров трансформатора, входящего в известную серию, будем предполагать, что такие его параметры, как потери и напряжение короткого замыкания, потери и ток холостого хода — заданы. В этом случае экономичность работы трансформатора в эксплуатации определяется заданными параметрами и может не рассматриваться. Оптимальным значением β при его варьировании в достаточно широких пределах будет то, при котором стоимость трансформатора окажется минимальной.

В расчетную формулу (3-17), кроме заданных и выбираемых при начале расчета величин, входят также величины, определяемые в ходе последующего расчета α_p и k_p . Из этих двух величин коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному (коэффициент

Роговского k_p) для широкого диапазона мощностей и напряжений трансформаторов с concentрическими обмотками изменяется в очень узких пределах от 0,93 до 0,97 и может быть принят постоянным и равным 0,95. Ширина приведенного канала рассеяния может быть приближенно, но с достаточной точностью определена по обобщенным данным существующих серий. Этот канал состоит из двух частей:

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}.$$

Первое из этих слагаемых — изоляционный промежуток между обмотками ВН и НН — a_{12} определяется по испытательному напряжению обмотки ВН и для данного класса изоляции обмоток является неизменным.

Второе слагаемое — приведенная ширина двух обмоток $\frac{a_1 + a_2}{3}$ — может быть найдено лишь после окончания расчета обмоток по их радиальным размерам и в обобщенном методе предварительного расчета может определяться только приближенно. Это слагаемое является одним из линейных размеров трансформатора и зависит, как и все линейные размеры, от мощности трансформатора. Предполагая для данной серии изменение линейных размеров с изменением мощности согласным с (3-21), делаем первое допущение о возможности приближенного, но с достаточной точностью, определения приведенной ширины двух обмоток по формуле

$$\frac{a_1 + a_2}{3} \approx k \sqrt[4]{S'}, \quad (3-28)$$

где k в зависимости от мощности трансформатора, металла обмоток, напряжения обмотки ВН и уровня потерь короткого замыкания P_k может быть найдено по табл. 3-3.

Формула (3-28) позволяет определить $(a_1 + a_2)/3$ приближенно на стадии предварительного расчета, предполагая эту величину постоянной при изменении β . В действительности с ростом β радиальные размеры обмоток также несколько возрастают. Учитывая, что $(a_1 + a_2)/3$ входит слагаемым в a_p , где первое слагаемое a_{12} постоянно, а также что в выражении (3-17) a_p умножается на коэффициент k_p , который с ростом β несколько умень-

Значения коэффициента k в формуле (3-28): $\frac{a_1 + a_2}{3} = k \sqrt{S'}$ для масляных трёхфазных

двухобмоточных трансформаторов с медными обмотками (для трансформаторов с обмотками из алюминиевого провода значение k , найденное из таблицы или по примечанию 5, умножить на 1,25)

Для трансформаторов с потерями P_K (см. примечание 6)

Мощность трансформатора, кВ·А	P_K по ГОСТ						$0,8 P_K$ по ГОСТ		
	1,2 P_K			P_K			$0,8 P_K$		
	10 кВ	35 кВ	110 кВ	10 кВ	35 кВ	110 кВ	10 кВ	35 кВ	110 кВ
До 100	0,8—0,6	—	—	0,8—0,6	—	—	0,8—0,6	—	—
160—630	0,6— —0,48	0,6—0,5	—	0,65— —0,52	0,65— —0,58	—	0,7—0,55	0,7—0,6	—
1000—6300	0,48— —0,4	0,5— —0,46	—	0,51— —0,43	0,54— —0,46	—	0,55—0,50	0,58—0,55	—
10 000—80 000	—	0,46— —0,44	—	—	0,48— —0,46	—	—	0,52—0,48	—
10 000—80 000	—	—	0,55—0,5	—	—	0,58— —0,66	—	—	0,62—0,6

Примечания: 1. Таблица действительна для обмоток двух- и многослойных цилиндрических, винтовых и непрерывных катушечных. Для многослойных цилиндрических обмоток из прямоугольного провода данные таблицы умножить на 0,9.

2. Для обмоток из алюминиевой фольги трансформаторов мощностью 25—630 кВ·А значения k определять как для обмоток из алюминиевого провода.

3. Для трехобмоточных трансформаторов с напряжением ВН 110 кВ принимать k для напряжения 35 кВ (для обмоток СН—НН).

4. Для однофазных трансформаторов определять k по мощности 1,5 S .

5. Для сухих трансформаторов с медными обмотками мощностью 10—160 кВ·А принимать $k=0,8 \div 0,74$; мощностью 160—1600 кВ·А с напряжением ВН до 10 кВ принимать $k=0,58 \div 0,48$.

6. За P_K принимать потери короткого замыкания по ГОСТ 12022-66, 11920-73 или 12965-74.

шается, предполагаемое постоянство $(a_1 + a_2)/3$ по существу является постоянством произведения $a_p k_p$.

В случае необходимости более точного определения $(a_1 + a_2)/3$, например при проектировании новой серии трансформаторов, значительно отличающихся от существующих параметрами, следует пользоваться материалами § 12-2.

В результате сделанных замечаний первой задачей является исследование связей между величиной β и параметрами трансформатора. Для решения этой задачи обратимся к выражению (3-17), которое может быть представлено в виде

$$d = Ax, \quad (3-29)$$

где A можно считать величиной постоянной:

$$A = 16 \sqrt[4]{\frac{S' a_p k_p}{f u_p B_c^2 k_c^2}}; \quad (3-30)$$

$$x = \sqrt[4]{\beta}. \quad (3-31)$$

Определим массу активной стали трансформатора, разделив магнитную систему на две части — стержни и ярма и подсчитав массу каждой части отдельно.

Масса стали в стержнях (рис. 3-5)

$$\begin{aligned} G_c &= c \Pi_c \gamma_{ст} (l + 2l_0) = \\ &= c \frac{\pi d^2}{4} k_c \gamma_{ст} \cdot 10^{-6} \left(\frac{\pi d_{12}}{\beta} + 2l_0 \right), \end{aligned} \quad (3-32)$$

где c — число активных (несущих обмотки) стержней; для трехфазного стержневого трансформатора $c=3$, для однофазного $c=2$;

Π_c — активное сечение стали стержня, см²;

$\gamma_{ст}$ — плотность стали: для холоднокатаной стали $\gamma_{ст} = 7650$ кг/м³; для горячекатаной стали $\gamma_{ст} = 7550$ кг/м³.

Если изоляционные расстояния от обмотки ВН до нижнего ярма (l'_0) и до верхнего (l''_0) неодинаковы, например при размещении над обмоткой прессующего кольца, то $l_0 = (l'_0 + l''_0)/2$.

Исследование данных большого числа трансформаторов различных серий, в том числе старых, рассчитанных

на применение горячекатаной стали, и новых, с применением холоднокатаной стали, показало, что отношение среднего диаметра витка двух обмоток d_{12} к диаметру стержня трансформатора d изменяется в очень узких пределах и для любой заданной серии трансформаторов, и тем более для отдельного трансформатора, может быть принято равным постоянной величине a :

$$d_{12} = ad. \quad (3-33)$$

Значения a для трансформаторов от 25 до 63 000 кВ·А, с применением горячекатаной стали с медными обмотками, составляют от 1,3 до 1,38 и для трансформаторов на холоднокатаной стали в том же диапазоне мощностей от 1,3 до 1,42. Величина a зависит от мощности и класса напряжения, а также от принятого уровня потерь короткого замыкания трансформатора P_K и от металла обмоток. С уменьшением P_K растут масса металла и радиальные размеры обмоток, что приводит к некоторому увеличению a . Для алюминиевых обмоток a больше, чем для медных. Ориентировочные значения a для приближенного расчета основных размеров масляного трансформатора могут быть выбраны по табл. 3-4 в зависимости от мощности трансформатора, номинального напряжения обмотки ВН и принятых потерь короткого замыкания в долях от нормы P_K по ГОСТ.

Таблица 3-4

Ориентировочные значения $a = d_{12}/d$ (медные обмотки)

Мощность трансформатора S , кВ·А	Уровень потерь короткого замыкания P_K (см. табл. 3-3, прим. 6)	Значения a при напряжении обмотки ВН, кВ		
		6 и 10	35	110
До 6300 включительно	1,2 P_K по ГОСТ	1,35	1,37	—
	P_K по ГОСТ	1,38	1,40	—
	0,8 P_K по ГОСТ	1,42	1,45	—
Свыше 6300	1,2 P_K по ГОСТ	—	1,33	1,33
	P_K по ГОСТ	—	1,37	1,37
	0,8 P_K по ГОСТ	—	1,40	1,40

Примечания: 1. Для обмоток из алюминия значения a , полученные из таблицы, умножить на 1,06.
2. Для обмоток из алюминиевой фольги значения a , полученные из таблицы, умножить на 1,06·1,04=1,10.

Для трансформаторов с естественным воздушным охлаждением мощностью от 10 до 160 кВ·А класса напряжения 0,5 кВ при медных обмотках можно принять соответственно $\alpha \approx 1,7 \div 1,6$ для алюминиевых $\alpha \approx 1,8 \div 1,7$. Для трансформаторов мощностью 160—1600 кВ·А класса напряжения 10 кВ при медных обмотках $\alpha \approx 1,7 \div 1,6$; при алюминиевых $\alpha \approx 1,8 \div 1,7$.

Принятое выше (3-33) положение о постоянстве отношения двух диаметров является вторым допущением, вводящим в расчет приближенно определяемую величину (α).

Замечая теперь, что $d = Ax$; $d_{12} = ad = aAx$ и $\beta = x^4$ и подставляя эти значения в (3-32), получим массу стали в стержнях, кг:

$$G_c = \frac{A_1}{x} + A_2 x^2, \quad (3-34)$$

где для трехфазного трансформатора, рассчитанного на холоднокатаной стали,

$$A_1 = 5,66 \cdot 10^{-2} a A^3 k_c; \quad (3-35)$$

$$A_2 = 3,60 \cdot 10^{-2} A^2 k_c l_0. \quad (3-36)$$

Для однофазного трансформатора с двумя активными стержнями коэффициенты в выражениях (3-35) и (3-36) соответственно равны: $3,78 \cdot 10^{-2}$ и $2,40 \cdot 10^{-2}$.

Для горячекатаной стали коэффициенты A_1 , A_2 , B_1 , B_2 для трехфазного и однофазного трансформаторов, полученные здесь и дальше, следует умножить на отношение плотностей $7,55/7,65$.

При расчете объема и массы стали ярм рассматриваем каждое ярмо как состоящее из двух частей. Часть, заключенная между осями двух крайних стержней, имеет в каждом ярме постоянное активное сечение $\Pi_{я}$, длину $(c-1)C$ и массу стали в двух ярмах $G'_я$ (см. рис. 3-5). Часть, включающая две половинки угла магнитной системы слева и справа от осей крайних стержней, имеет массу стали в двух ярмах $G''я$. Общая масса стали двух ярм

$$G_{я} = G'_я + G''я, \quad (3-37)$$

где масса двух ярм первой части

$$G'_я = 2\Pi_{я}(c-1)C\gamma_{ст}. \quad (3-38)$$

Объем угла магнитной системы в предварительном расчете можно определить как произведение активного сечения стержня на среднюю высоту ярма, определяемую как частное от деления полного сечения ярма $P_{\phi.я}$ на общую толщину набора пластин стержня или сумму толщин пакетов стержня Σb . Масса стали двух половин углов в двух ярмах

$$G_{я}^* = 2 \frac{P_c}{2} \frac{P_{\phi.я}}{\Sigma b} \gamma_{ст}. \quad (3-39)$$

Считая сечение ярма, вообще говоря, не равным сечению стержня $P_{я} = k_{я} P_c$, заменяя (по § 2-2 и 2-3) $P_c = \pi d^2 k_c / 4$; $P_{\phi.я} = \pi d^2 k_{кр} k_{я} / 4$ и принимая согласно рис. 3-5

$$C = d_{12} + a_{12} + 2a_2 + a_{22}, \quad (3-40)$$

получаем:

$$G_{я} = 2 \left[\frac{\pi d^2}{4} k_c k_{я} (c - 1) (d_{12} + a_{12} + 2a_2 + a_{22}) + \right. \\ \left. + \frac{\pi d^2}{4} k_c \frac{\pi d^2}{4} k_{кр} k_{я} \frac{1}{\Sigma b} \right] \gamma_{ст} \cdot 10^{-6}. \quad (3-41)$$

Радиальный размер обмотки ВН a_2 изменяется с мощностью и напряжением трансформатора, зависит от материала обмоток — меди или алюминия и с учетом допущения (третьего в данном методе) о пропорциональном изменении всех линейных размеров трансформатора (§ 3-4) приближенно может быть выражен через диаметр стержня

$$2a_2 = bd.$$

Ориентировочные значения b для приближенного расчета массы стали силовых трансформаторов могут быть выбраны по табл. 3-5.

Для трансформаторов с естественным воздушным охлаждением от 10 до 160 кВ·А, класса напряжения 0,5 кВ, при медных обмотках можно принять $b \approx 0,26$, при алюминиевых $b \approx 0,33$. Для трансформаторов мощностью от 160 до 400 кВ·А, класса напряжения 10 кВ, при медных обмотках $b \approx 0,22$, при алюминиевых $b \approx 0,28$. Для трансформаторов мощностью от 630 до 1600 кВ·А, того же класса напряжения, при медных обмотках $b \approx 0,18$, при алюминиевых $b \approx 0,23$.

Коэффициент $k_{я}$ может быть выбран согласно указаниям § 2-2 по табл. 2-3.

Ориентировочные значения $b=2a_2/d$ (медные обмотки)

Мощность трансформатора, кВ·А	Для трансформаторов с потерями короткого замыкания P_K (см. табл. 3-3, прим. 6)							
	1,2 P_K по ГОСТ			P_K по ГОСТ			0,8 P_K по ГОСТ	
	10 кВ	35 кВ	110 кВ	10 кВ	35 кВ	110 кВ	10 кВ	35 кВ
До 100	0,50—0,44	—	—	0,54—0,48	—	—	0,58—0,50	—
100—630	0,44—0,36	0,54—0,4	—	0,48—0,4	0,58—0,44	—	0,50—0,42	0,6—0,46
1000—6300	0,22—0,20	0,28—0,20	—	0,26—0,24	0,29—0,23	—	0,30—0,26	0,33—0,25
10 000—80 000	—	0,21	0,23	—	0,25	0,33	—	0,27
10 000—80 000	—	—	0,23	—	—	0,33	—	—

Примечания: 1. Для обмоток из алюминиевого провода значения b , полученные из таблицы, умножить на 1,25.
 2. Для трансформаторов мощностью 25—С30 кВ·А с обмотками из алюминиевой фольги значения b , полученные из таблицы, умножить на 1,25—0,90—1,125.
 3. Для однофазных трансформаторов определять b по мощности 1,5 S.

Заменяя в (3-41) $d = Ax$; $d_{12} = aAx$; $2a_2 = bAx$; $\gamma_{ст} = 7650 \text{ кг/м}^3$, для магнитной системы по рис. 3-5 при $c=3$ получаем:

$$G_{я} = 2,40 \cdot 10^{-2} k_c k_{я} \left[A^2 x^2 (aAx + bAx + a_{12} + a_{22}) + 0,393 A^3 x^3 \left(k_{кр} \frac{d}{\Sigma b} \right) \right].$$

Заметив, что для магнитных систем с диаметром стержня от 8 до 75 см выражение $k_{кр} d / \Sigma b \approx 1,01$ (с колебаниями от 1,00 до 1,025) и произведя приведение подобных членов, для трехфазного двухобмоточного трансформатора получим:

$$G_{я} = B_1 x^3 + B_2 x^2, \quad (3-42)$$

где

$$B_1 = 2,40 \cdot 10^{-2} k_c k_{я} A^3 (a + b + e); \quad (3-43)$$

$$B_2 = 2,40 \cdot 10^{-2} k_c k_{я} A^2 (a_{12} + a_{22}). \quad (3-44)$$

Здесь B_1 и B_2 в килограммах, а $e=0,398$ для ярма с прямоугольной формой поперечного сечения и $e=0,411$ для ярма с многоступенчатой формой поперечного сечения.

Для однофазного трансформатора ($c=2$)

$$B_1 = 1,20 \cdot 10^{-2} k_c k_{я} A^3 (a + b + 2e); \quad (3-43')$$

$$B_2 = 1,20 \cdot 10^{-2} k_c k_{я} A^2 (a_{12} + a_{22}). \quad (3-44')$$

Для трехфазного трехобмоточного трансформатора (рис. 3-7)

$$C = d_{12} + a_{12} + 2a_2 + 2a_{23} + 2a_3 + a_{33};$$

$$B_1 = 2,40 \cdot 10^{-2} k_c k_{я} A^3 (a + b_2 + b_3 + e); \quad (3-43'')$$

$$B_2 = 2,40 \cdot 10^{-2} k_c k_{я} A^2 (a_{12} + 2a_{23} + a_{33}), \quad (3-44'')$$

где $b_2 = 2a_2/d$ и $b_3 = 2a_3/d$ определяются по табл. 3-5 для соответствующих мощностей, уровней потерь и классов напряжения трехобмоточного трансформатора.

Для однофазного трехобмоточного трансформатора коэффициенты в (3-43'') и (3-44'') следует принять 1,20 и заменить e на $2e$.

В пространственной магнитной системе по рис. 2-7, а стержни имеют такую же конструкцию, как и в рассмот-

ренной системе по рис. 3-5 и масса стали в них может быть рассчитана по (3-34) — (3-36). Расчет массы стали в навитых ярмах можно выполнить в соответствии с рис. 8-6 и (8-20) и (8-21). Учитывая, что для трансформаторов мощностью от 25 до 6300 кВ·А и соответственно для диаметров стержня от 8 до 40 см можно принять $2r = 0,125 d$, а размер сегмента $\delta = 0,035 d$, величины, входящие в формулу (8-21), можно принять:

$$b_1 = \frac{d}{2} - r - \delta = 0,4025 d; \quad b_2 = \frac{d}{2} - r = 0,4375 d;$$

$$l_1 = C - d \cos 30^\circ = C - 0,866 d;$$

$$l_2 = C - (d - 8r) \cos 30^\circ = C - 0,433 d;$$

$$R_1 = \frac{d}{2} - r = 0,4375 d; \quad R_2 = d - 4r = 0,75 d;$$

$$R_3 = \frac{d}{2} - 3r = 0,3125 d; \quad b_{\text{я}} = b_1 + b_2 = 0,84 d.$$

Подставляя эти значения в (8-21) для определения площади ярма в плане $P'_{\text{я}} = 3 b_1 l_1 + 3 b_2 l_2 + \pi R_1^2 + \pi R_2^2 - \pi R_3^2$; используя (8-20) и (8-5), принимая $C = d_{12} + a_{12} + 2a_2 + a_{22}$ по (3-40) и считая $k_{\text{я}} = 1/\sqrt{3}$; $\gamma_{\text{ст}} = 7650 \text{ кг/м}^3$, получаем массу стали двух ярем:

$$G_{\text{я}} = 14310 k_{\text{с}} k_{\text{я}} \cdot 10^{-6} d^2 [2,52 (d_{12} + a_{12} + 2a_2 + a_{22}) + 0,448 d]$$

и окончательно при $d = Ax$; $d_{12} = aAx$ и $a_2 = bAx$:

$$G_{\text{я}} = B_1 x^3 + B_2 x^2,$$

где

$$B_1 = 3,605 \cdot 10^{-2} k_{\text{с}} k_{\text{я}} A^3 (a + b + 0,178); \quad (3-43''')$$

$$B_2 = 3,605 \cdot 10^{-2} k_{\text{с}} k_{\text{я}} A^2 (a_{12} + a_{22}). \quad (3-44''')$$

Масса стали навитой пространственной магнитной системы по рис. 2-7, б и 8-7 может быть найдена как сумма массы стали стержней по (3-34) — (3-36) и массы стали шести полукольцевых ярем в трех навитых кольцах. Активное сечение ярма $P_{\text{я}} = P_{\text{с}}/2 = \pi d^2 k_{\text{с}}/2 \cdot 4$; $k_{\text{я}} = 1,0$. Масса стали ярем

$$G_{\text{я}} = 3 \cdot 2 \frac{\pi d^2}{2 \cdot 4} k_{\text{с}} \frac{\pi C'}{2} \gamma_{\text{ст}} \cdot 10^{-6}.$$

Для современных силовых трансформаторов мощностью от 25 до 630 кВ·А можно принять $C' = 0,9 C$. Заменив C по (3-40)), получаем массу ярма

$$G_{\text{я}} = 2,55 k_c \cdot 10^{-2} A^2 x^2 (aAx + a_{12} + bAx + a_{22});$$

$$G_{\text{я}} = B_1 x^3 + B_2 x^2,$$

где

$$B_1 = 2,55 \cdot 10^{-2} k_c A^3 (a + b); \quad (3-43^{\text{IV}})$$

$$B_2 = 2,55 \cdot 10^{-2} k_c A^2 (a_{12} + a_{22}). \quad (3-44^{\text{IV}})$$

Масса стали одного угла плоской магнитной системы по рис. 3-5 может быть найдена по (3-42) и (3-43) для

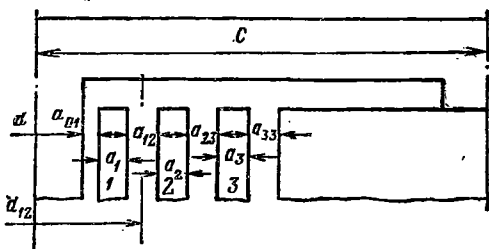


Рис. 3-7. Расположение обмоток в окне трехобмоточного трансформатора.

$e/2$ (при однофазной магнитной системе для e) при $a = 0$; $b = 0$ и $B_2 = 0$:

$$G_{\text{я}} = \frac{e}{2} 2,40 \cdot 10^{-2} k_c k_{\text{я}} A^3 x^3.$$

Для ярма с прямоугольной формой поперечного сечения

$$G_{\text{я}} = 0,478 \cdot 10^{-2} k_c k_{\text{я}} A^3 x^3; \quad (3-45)$$

для ярма с многоступенчатой формой поперечного сечения

$$G_{\text{я}} = 0,493 \cdot 10^{-2} k_c k_{\text{я}} A^3 x^3. \quad (3-45')$$

Масса стали одного угла пространственной магнитной системы по рис. 2-7, а может быть по (8-22) и (8-5) для $r = 0,0625 d$ найдена по формуле

$$G_{\text{я}} = 0,435 \cdot 10^{-2} k_c k_{\text{я}} A^3 x^3, \quad (3-45'')$$

где $k_{\text{я}} = 1/\sqrt{3}$.

В пространственной магнитной системе по рис. 2-7,6 углы в ярмах не выделяются.

В выражения (3-35), (3-36), (3-43) и (3-44) входят величины, определяемые или выбираемые в начале расчета A , k_c , k_a , изоляционные расстояния l_0 , a_{12} , a_{22} , определяемые уровнем развития изоляционной техники и требованиями к электрической прочности трансформатора и известные на начальной стадии расчета, а также величины, принимаемые постоянными для данной серии, ее части или данного трансформатора a , b . Отсюда следует, что масса стали трансформатора может быть найдена по исходным данным расчета в самом его начале, еще до установления основных размеров магнитной системы. Общая масса стали магнитной системы

$$G_{ст} = \frac{A_1}{x} + (A_2 + B_2) x^2 + B_1 x^3. \quad (3-46)$$

Масса стали в стержнях, ярмах и общая масса стали $G_{ст}$ может быть, таким образом, рассчитана для стержневых трансформаторов однофазных и трехфазных с плоской или пространственной магнитной системой двухобмоточных и трехобмоточных с медными или алюминиевыми обмотками с естественным воздушным или масляным охлаждением. Металл обмоток учитывается при определении a_p и A . Выбор той или иной изолирующей и теплоотводящей среды — воздуха или масла, определяет допустимую индукцию в магнитной системе и величину изоляционных расстояний.

Масса металла обмоток G_0 (кг) связана с потерями короткого замыкания P_K (Вт), приведенными к температуре $+75^\circ\text{C}$, следующим выражением (§ 7-1):

$$K\Delta^2 G_0 = P_{осн} = k_d P_K, \quad (3-47)$$

где K — постоянный коэффициент, зависящий от удельного электрического сопротивления и плотности металла обмоток, для меди $K_M = 2,4$, для алюминия $K_A = 12,75$;

Δ — средняя плотность тока в обмотках, $\text{A}/\text{мм}^2$;

$P_{осн}$ — основные потери в обмотках, Вт;

k_d — коэффициент, учитывающий добавочные потери в обмотках, потери в отводах, в стенках бака и других металлических конструкциях от гистерезиса и вихревых токов, возникающие от воздействия поля рассеяния ($k_d < 1$).

Значения k_d в формуле (3-47) для трехфазных трансформаторов

Мощность трансформатора S , кВ·А	До 100	160—630	1000—6300	10 000—16 000	25 000—63 000	80 000—100 000
k_d	0,97	0,96— —0,92	0,91— —0,90	0,90— —0,87	0,86— —0,78	0,77— —0,75

Примечания: 1. Для сухих трансформаторов мощностью 10—160 кВ·А принимать $k_d = 0,99 \div 0,96$ и мощностью 250—1600 кВ·А $k_d = 0,92 \div 0,86$.
2. Для однофазных трансформаторов определять k_d по мощности $1,5 S$.

Этот коэффициент для приближенного расчета может быть взят из табл. 3-6, составленной на основании исследования ряда серий трансформаторов.

Масса металла обмоток

$$G_o = \frac{k_d P_k}{K \Delta^2}. \quad (3-48)$$

При расчете отдельного трансформатора из серии предельное значение потерь короткого замыкания, как правило, бывает задано. При расчете новой серии обычно задаются несколькими значениями P_k и затем просчитывают эти варианты. В том и другом случае расчет начинается при определенном известном значении P_k . Это обстоятельство налагает ограничение на выбор среднего значения плотности тока в обмотках Δ и требует увязки выбираемого значения Δ с заданной мощностью P_k и основными размерами магнитной системы. Связь между этими величинами (§ 7-1) определяется для медного провода выражением

$$\Delta_M = 0,746 k_d \frac{P_k u_B}{S d_{12}}, \quad (3-49)$$

а для алюминиевого провода

$$\Delta_A = 0,463 k_d \frac{P_k u_B}{S d_{12}}, \quad (3-49')$$

где S — мощность трансформатора, кВ·А;

u_B — э. д. с. одного витка, В;

k_d — коэффициент из формулы (3-47).

В сухих трансформаторах вследствие худших условий охлаждения плотность тока во внутренней обмотке

обычно принимают меньшей, чем в наружной. Плотности токов обмоток могут существенно отличаться от их среднего арифметического значения, что приводит к общему увеличению потерь короткого замыкания по сравнению с величиной P_k , подставленной в выражение (3-49). Во избежание такого увеличения потерь рекомендуется для сухих трансформаторов Δ , полученное из формул (3-49) и (3-49'), умножить на 0,95.

Заменяя в выражении (3-49) $d_{12}=aAx$, $u_B=4,44 fB_c \times \times P_c \cdot 10^{-4}$, раскрывая $P_c = \frac{\pi d^2}{4} k_c$ и подставляя вычисленное Δ в (3-48), получаем:

$$G_o = C_1/x^2, \quad (3-50)$$

где

$$C_1 = K'_o \frac{Sa^2}{k_d k_c^2 B_c^2 f^2 u_a A^2}. \quad (3-51)$$

Для медных обмоток

$$K'_{om} = \frac{10^7}{2,4 \cdot 0,746^2 \cdot 1,11^2 \pi^2} = 61,6 \cdot 10^4;$$

для алюминиевых обмоток

$$K'_{oa} = \frac{10^7}{12,75 \cdot 0,463^2 \cdot 1,11^2 \pi^2} = 30,1 \cdot 10^4.$$

Для частоты 50 Гц

$$C_1 = K_o \frac{Sa^2}{k_d k_c^2 B_c^2 u_a A^2}, \quad (3-52)$$

где K_o — коэффициент, равный: для меди $K_{om}=2,46 \times \times 10^2$, для алюминия $K_{oa}=1,20 \cdot 10^2$. Для сухого трансформатора следует принимать: $K_{om}=2,60 \cdot 10^2$ и $K_{oa} = = 1,27 \cdot 10^2$; u_a — активная составляющая напряжения короткого замыкания, %.

По (3-50) можно подсчитать массу чистого металла обмоток на средней (номинальной) ступени напряжения обмотки ВН. Ввиду того что обмотки изготавливаются из изолированного провода, действительная масса провода для обмотки $G_{пр}$ находится путем умножения G_o на коэффициент, учитывающий массу изоляции, который в

предварительном расчете можно принять равным 1,03 для медного и 1,10 для алюминиевого провода. Кроме того, обмотка ВН при обычном регулировании напряжения на $\pm 5\%$ имеет на ступени $+5\%$ массу металла, повышенную на 5% по отношению к номинальной ступени. Для двух обмоток (ВН и НН) это повышение составит около 3% .

Для того чтобы учесть эти два фактора — изоляцию провода и регулирование напряжения, массу металла обмоток следует умножить на коэффициент $k_{н.р}$, равный $1,03 \cdot 1,03 = 1,06$ для медного провода и $1,10 \cdot 1,03 = 1,13$ для алюминиевого.

Общая стоимость активных материалов, руб., может быть представлена в виде

$$C_{\text{акт}} = c_{\text{ст}}(G_{\text{с}} + G_{\text{я}}) + c_0 k_{н.р} G_0, \quad (3-53)$$

где $c_{\text{ст}}$ и c_0 — цена 1 кг трансформаторной стали и 1 кг обмоточного провода.

Если $c_{\text{ст}}$ и c_0 определяются не по прейскурантам на эти материалы, а с учетом всех дополнительных затрат, связанных с изготовлением остова и обмоток, то по (3-53) можно рассчитать не только стоимость активных материалов, но также и стоимость активной части трансформатора — остова вместе с обмотками $C_{\text{а.ч}}$.

Иногда для сравнения различных вариантов расчета бывает удобно выразить $C_{\text{а.ч}}$ в условных единицах. Так, если за единицу принять стоимость 1 кг стали, то $C_{\text{а.ч}}$ принимает вид:

$$C'_{\text{а.ч}} = B_1 x^3 + (B_2 + A_2) x^2 + \frac{A_1}{x} + k_{о.с} k_{н.р} \frac{C_1}{x^2}, \quad (3-54)$$

где

$$k_{о.с} = c_0 / c_{\text{ст}}.$$

Коэффициент $k_{о.с}$ зависит от цен на материалы обмоток и магнитной системы и изменяется с изменением марки стали и металла обмоток. Для алюминиевых обмоток, имеющих при прочих равных условиях относительно больший объем, требующих большего количества изоляционных материалов и большей затраты труда на намотку, $k_{о.с}$ обычно имеет большее значение, чем для медных обмоток.

Ориентировочные значения $k_{0,с}$ в формуле (3-54)

Вид охлаждения	Способ регулирования	Класс напряжения, кВ	Мощность, кВ·А	Металл обмоток	Сталь листовая			Сталь рулонная		
					Э330 0,408 руб/кг	Э330А 0,456 руб/кг	Э330А 0,502 руб/кг	Э330 0,408 руб/кг	Э330А 0,456 руб/кг	Э330А 0,502 руб/кг
Масляное	ПВ	10	25—630	Медь Алюминий	1,78 1,70	1,66 1,58	1,58 1,48	2,11 2,02	1,97 1,88	1,84 1,77
	ПВ	35	160—630	Медь Алюминий	2,02 2,14	1,90 1,99	1,77 1,86	2,42 2,54	2,25 2,36	2,11 2,22
	ПВ	10 и 35	1000—16 000	Медь Алюминий	2,02 2,21	1,86 2,03	1,76 1,92	2,41 2,54	2,21 2,42	2,09 2,29
	РПН	35	1000—16 000	Медь Алюминий	2,16 2,44	1,98 2,24	1,87 2,12	2,57 2,91	2,36 2,65	2,25 2,52
	РПН	110	2500—4000	Медь Алюминий	1,87 2,44	1,77 2,31	1,68 2,20	2,22 2,90	2,12 2,76	2,00 2,62
	РПН	110	6300—16 000	Медь Алюминий	2,16 2,44	1,98 2,24	1,87 2,12	2,57 2,91	2,36 2,65	2,23 2,52
Воздушное, класс изоляции В	РПН	110 и 35	25 000— —63 000	Медь Алюминий	2,46	2,26	2,14	2,94	2,70	2,53
	ПВ	10	160—1600	Медь Алюминий	4,25 8,18	3,90 7,50	3,70 7,10	5,07 9,75	4,65 8,93	4,40 8,45

Не применяется

Ориентировочные значения $k_{o.c}$ для приближенного расчета трансформатора приведены в табл. 3-7. Эти значения рассчитаны с учетом реального расхода активных и других материалов для остова и обмоток, зарплаты производственных рабочих, цеховых, общезаводских и некоторых других расходов и нормативных накоплений. Поэтому (3-54) позволяет определить в условных единицах расчетную цену активной части трансформатора.

Для того чтобы от условных единиц перейти к денежному выражению, следует $C'_{a.ч}$, выраженную в условных единицах, умножить на цену стали по прейскуранту, коэффициент $K_{ст}$ из табл. 1-11 и коэффициент отходов стали $K_{отх}$ по § 1-4.

Для определения значения x , соответствующего минимуму стоимости активных материалов, следует взять:

$$\frac{dC'_{a.ч}}{dx} = 0.$$

Проведя эту операцию, получим уравнение

$$x^5 + Bx^4 - Cx - D = 0, \quad (3-55)$$

где

$$B = \frac{2}{3} \frac{B_2 + A_2}{B_1}; \quad C = \frac{A_1}{3B_1};$$

$$D = \frac{2}{3} \frac{C_1}{B_1} k_{o.c} k_{и.р.}$$

При расчете отдельного трансформатора и заданном значении P_K уравнение (3-55) дает оптимальное значение $\beta(x)$, соответствующее минимальной стоимости активных материалов или активной части. Это решение может быть найдено номографическим или графическим методом путем расчета $C'_{a.ч}$ для нескольких вариантов β и построения кривой $C'_{a.ч} = f(\beta)$. Второй путь является более предпочтительным потому, что дает возможность не только определить β , соответствующее минимальной стоимости активной части, но также и диапазон значений β , в пределах которого $C'_{a.ч}$ отклоняется от минимума на практически допустимую величину.

При расчете серии трансформаторов обычно стараются найти вариант расчета, соответствующий мини-

мальной сумме стоимости трансформатора, отнесенной к определенному промежутку времени, с затратами в эксплуатации за этот же промежуток времени. В этом случае оптимальный вариант трансформатора может и не совпадать с вариантом минимальной стоимости активной части.

Выбор того или иного значения β определяет также параметры холостого хода трансформатора. Если известны массы стали стержней и ярм и соответствующие индукции, а следовательно, и удельные потери в стали, то потери холостого хода для плоской магнитной системы из горячекатаной стали

$$P_x = k'_d (p_c G_c + p_y G_y), \quad (3-56)$$

где k'_d может быть найден в соответствии с замечаниями к формуле (8-27).

Для расчета потерь в плоской шихтованной магнитной системе по схеме рис. 2-6, *а* или *б* со стяжкой стержней и ярм бандажам или с прессовкой стержней расклиниванием с обмоткой, а ярм — ярмовыми балками, не имеющей сквозных шпилек в стержнях и ярмах, изготовленной из холоднокатаной стали, следует пользоваться формулой (8-32) при $k_\Phi = 4$ для трехфазной и $k_\Phi = 2$ для однофазной системы. Коэффициент $k_{y,л}$ в зависимости от числа косых и прямых стыков находится по табл. 8-6.

Расчет потерь холостого хода в пространственной магнитной системе по рис. 2-7, *а* следует производить по формуле (8-38) с определением коэффициентов для этой формулы по табл. 8-7 для соответствующих индукций в стержне. Индукцию в ярме для этой системы до установления ее основных размеров следует принимать равной индукции в стержне.

Потери холостого хода в навитой пространственной магнитной системе по рис. 2-7, *б* могут быть рассчитаны по формуле (8-39).

Реактивная составляющая тока холостого хода, %, может быть найдена по намагничивающей мощности холостого хода Q , В·А, и мощности трансформатора S , кВ·А:

$$i_{op} = \frac{Q \cdot 10^2}{S \cdot 10^3} = \frac{Q}{10S}. \quad (3-57)$$

При предварительном расчете полный ток холостого хода может быть с достаточной точностью принят равным его реактивной составляющей.

Для плоской магнитной системы из горячекатаной стали намагничивающая мощность холостого хода, $W \cdot A$ может быть найдена по упрощенной по сравнению с (8-42) формуле

$$Q = k_d'' (q_c G_c + q_y G_y), \quad (3-58)$$

где k_d'' — коэффициент, учитывающий намагничивающую мощность для зазоров в стыках ярм и стержней. Для листовой горячекатаной стали он может быть принят от 1,6 до 1,2 для трансформаторов мощностью от 25 до 1000 кВ·А, приблизительно 1,15 для трансформатора мощностью от 1600 до 6300 кВ·А и 1,2—1,25 соответственно от 10 000 до 80 000 кВ·А.

Намагничивающая мощность для плоской магнитной системы из холоднокатаной стали может быть рассчитана по формуле (8-44). Коэффициент $k_\Phi = 4$ для трехфазной и $k_\Phi = 2$ для однофазной магнитной системы. Коэффициент $k_{y,т}$ может быть найден по табл. 8-12. Площадь зазора P_z для прямого стыка равна активному сечению стержня

$$P_z = P_c = 0,785 k_c A^2 x^2 \quad (3-59)$$

и для косого стыка

$$P_z = P_c \sqrt{2} = 1,11 k_c A^2 x^2. \quad (3-59')$$

Для пространственной магнитной системы по (рис. 2-7, а) намагничивающая мощность рассчитывается по формуле (8-46) с учетом замечаний к этой формуле и для навитой пространственной системы по рис. 2-7, б по формуле (8-47).

В других случаях при определении в предварительном расчете потерь и тока холостого хода следует пользоваться указаниями § 8-2 и 8-3.

Плотность тока в обмотках может быть найдена из (3-48)

$$\Delta = \sqrt{\frac{k_d P_k}{K G_0}}. \quad (3-60)$$

Повышение плотности тока ведет к увеличению нагрева обмотки. Поэтому обычно в медных обмотках мас-

ляных трансформаторов стараются выдержать $\Delta_m \leq 4,5 \text{ А/мм}^2$, а в алюминиевых $\Delta_a \leq 2,7 \text{ А/мм}^2$ (для сухих трансформаторов соответственно 3,0 и 2,0 А/мм²).

Замечая, что $G_0 = C_1/x^2$, находим предельное значение x , при котором Δ не превышает нормальный предел: для меди

$$x_{\text{макс}} \leq 4,5 \sqrt{\frac{2,4 C_1}{k_d P_k}}; \quad (3-61)$$

для алюминия

$$x_{\text{макс}} \leq 2,7 \sqrt{\frac{12,75 C_1}{k_d P_k}}. \quad (3-61')$$

Обмотки трансформатора должны выдерживать весьма значительные механические силы, которые могут возникнуть при коротком замыкании. Рассмотрим радиальные силы, возникающие между концентрическими обмотками. Суммарная радиальная сила, H , действующая на каждую из двух концентрических обмоток, может быть записана так (§ 7-3):

$$F_p = 0,628 (i_{\text{к.м}} \omega)^2 \beta k_p \cdot 10^{-6},$$

где $i_{\text{к.м}}$ — мгновенное максимальное значение тока короткого замыкания для любой из двух обмоток;

ω — полное число витков той же обмотки.

Заменяя

$$i_{\text{к.м}} = k_{\text{к.з}} I; \quad k_{\text{к.з}} = 1,41 \frac{100}{u_k} \left(1 + e^{-\frac{\pi u_a}{u_p}} \right);$$

$$\omega = \frac{U}{u_b}; \quad u_b = 4,44 f B_c \frac{\pi}{4} d^2 k_c \cdot 10^{-4}$$

и замечая, что

$$d^4 = A^4 \beta = 16^4 \frac{S' a_p k_p}{f u_p B_c^2 k_c^2} \beta;$$

$S' = S/3$ для трехфазного и $S' = S/2$ для однофазного трансформатора, приходим к выражениям: для трехфазного трансформатора

$$F_p = 26,28 \frac{k_{\text{к.з}}^2 u_p S}{f a_p}, \quad (3-62)$$

и для однофазного

$$F_p = 39,42 \frac{k_{к.з}^2 u_p S}{f a_p} . \quad (3-62')$$

Из выражения (3-62) следует, что суммарная радиальная сила не зависит от β и металла обмотки.

Механическое растягивающее напряжение в проводе обмотки σ_p , МПа, может быть определено по известной формуле

$$\sigma_p = \frac{F_p}{2\pi\omega\Pi} , \quad (3-63)$$

где Π — сечение одного витка обмотки, мм².

Подставляя F_p из (3-62) и замечая, что $\omega = U/u_B$; $\Pi = I/\Delta$;

$$\Delta = 0,746 k_d \frac{P_k u_B}{S d_{12}}$$

для медных обмоток и

$$\Delta = 0,463 k_d \frac{P_k u_B}{S d_{12}}$$

для алюминиевых обмоток;

$$d_{12} = aAx;$$

$$u_p = \frac{7,9 f S' \beta a_p k_p}{u_B^2} 10^{-3} ,$$

получаем:

$$\sigma_p = Mx^3, \quad (3-64)$$

где для медных обмоток в трехфазном трансформаторе

$$M_M = 0,2453 \cdot 10^{-4} k_{к.з}^2 k_d k_p \frac{P_k}{aA} \quad (3-65)$$

и для алюминиевых обмоток

$$M_A = 0,1519 \cdot 10^{-4} k_{к.з}^2 k_d k_p \frac{P_k}{aA} . \quad (3-65')$$

Для однофазного трансформатора коэффициенты в выражениях (3-65) и (3-65') соответственно равны $0,3678 \cdot 10^{-4}$ и $0,2275 \cdot 10^{-4}$. Здесь M_M и M_A выражены в МПа.

Из выражения (3-64) следует, что растягивающие напряжения в проводе обмотки возрастают с увеличением β . Обычно для медного провода допускают среднее значение σ_p , определяемое по формуле (3-63), не более 60 МПа (§ 7-3), считая, что при этом в отдельных точках поперечного сечения обмотки эти напряжения могут достигать двойной величины, т. е. до 120 МПа. Для алюминия можно допустить среднее значение $\sigma_p = 25$ МПа.

Из уравнения (3-64) находим:

$$x = \sqrt[3]{\sigma_p / M} \quad (3-66)$$

и значение x для медного провода $x \leq \sqrt[3]{60 / M_M}$ и для алюминиевого провода $x \leq \sqrt[3]{25 / M_A}$.

3-6. АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРА С ИЗМЕНЕНИЕМ β (ПРИМЕР РАСЧЕТА)

Выяснение влияния β на расход активных материалов и некоторые другие параметры трансформатора удобнее всего провести на реальном примере. Для этого по методике, разработанной в § 3-5, проведем предварительный расчет трехфазного масляного трансформатора типа ТМ-1600/35 мощностью 1600 кВ·А с номинальным напряжением обмотки ВН 35 кВ. Расчет проводится для двух вариантов трансформатора — вариант I — трансформатор с плоской шихтованной магнитной системой по рис. 2-6, д с медными обмотками и вариант II — трансформатор с комбинированной пространственной магнитной системой по рис. 2-7, а со стержнями, собранными из плоских пластин и навитыми ярами, с обмотками из алюминиевого провода.

Задание

Тип трансформатора ТМ-1600/35 с концентрическими обмотками. Мощность трансформатора $S = 1600$ кВ·А; число фаз $m = 3$; частота $f = 50$ Гц. Номинальные напряжения обмоток: ВН $35\,000 \pm \pm(2 \times 2,5\%)$ В; НН 690 В; схема и группа соединения У/У-0. Переключение ответвлений без возбуждения (ПВВ). Режим работы — продолжительный; установка — наружная.

Вариант I. Трансформатор должен соответствовать требованиям ГОСТ 11677-75 и ГОСТ 11920-73. Параметры трансформатора: напряжение короткого замыкания $u_k = 6,5\%$; потери короткого замыкания $P_k = 18\,000$ Вт, потери холостого хода $P_x = 3650$ Вт (уровень Б по ГОСТ 11920-73 для стали марки Э330А 0,35 мм); ток холостого хода $i_0 = 1,4\%$.

Вариант II. Трансформатор должен соответствовать требованиям ГОСТ 11677-75 и ГОСТ 11920-73 за исключением тока холостого хода и потерь короткого замыкания. Напряжение короткого замыкания $u_k = 6,5\%$, потери короткого замыкания $P_k = 16\,200$ Вт (снижены по отношению к норме ГОСТ 11920-73 на 10%); потери холостого хода $P_x = 3100$ Вт (уровень А по ГОСТ 11920-73); ток холо-

стого хода $l_0 = 1,8\%$ (для пространственной магнитной системы повышен на 30% по отношению к уровню ГОСТ).

Расчет основных электрических величин и изоляционных расстояний

Расчет проводим для трехфазного трансформатора стержневого типа с concentрическими обмотками.

Мощность одной фазы и одного стержня

$$S_\phi = S' = \frac{S}{3} = \frac{1600}{3} = 533,3 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Номинальные (линейные) токи на сторонах

$$\text{ВН} \quad I_2 = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35\,000} = 26,4 \text{ А}_2$$

$$\text{НН} \quad I_1 = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 690} = 1339 \text{ А}.$$

Фазные токи обмоток (схема соединения — звезда) равны линейным токам. Фазные напряжения обмоток ВН и НН при этом соединении

$$U_{\phi 2} = \frac{35\,000}{\sqrt{3}} = 20\,207 \text{ В}; \quad U_{\phi 1} = \frac{690}{\sqrt{3}} = 399 \text{ В}.$$

Испытательные напряжения обмоток (по табл. 4-1): для обмотки ВН $U_{исп2} = 85 \text{ кВ}$; для обмотки НН $U_{исп1} = 5 \text{ кВ}$.

По табл. 5-8 выбираем тип обмоток.

Вариант I. Обмотка ВН при напряжении 35 кВ и токе 26,4 А — катушечная непрерывная; обмотка НН при напряжении 0,69 кВ и токе 1339 А — винтовая.

Вариант II. Обмотки ВН и НН при тех же токах и напряжениях — многослойные цилиндрические и винтовые из прямоугольного провода.

Для испытательного напряжения обмотки ВН $U_{исп2} = 85 \text{ кВ}$ по табл. 4-5 находим изоляционные расстояния (рис. 3-5): $a_{12} = 2,7 \text{ см}$, $l_0 = 7,5 \text{ см}$, $a_{22} = 3,0 \text{ см}$, для $U_{исп1} = 5 \text{ кВ}$ по табл. 4-4 находим $a_{01} = 1,5 \text{ см}$ (винтовая обмотка НН по табл. 5-4).

Вариант I_М

Плоская шихтованная магнитная система, обмотки из медного провода.

Определение исходных данных расчета

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = k \sqrt{S'} = 0,52 \sqrt{533,3} = 2,5 \text{ см}_1$$

$k = 0,52$ (табл. 3-3).

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} = 2,7 + 2,5 = 5,2 \text{ см}.$$

Активная составляющая напряжения короткого замыкания

$$u_a = \frac{P_k}{10S} = \frac{18000}{10 \cdot 1600} = 1,125\% ;$$

реактивная составляющая

$$u_p = \sqrt{u_k^2 - u_a^2} = \sqrt{6,5^2 - 1,125^2} = 6,4\% .$$

Согласно с указаниями в § 2-2 выбираем трехфазную стержневую шихтованную магнитную систему по рис. 2-6, д с косыми стыками на крайних стержнях и прямыми — на среднем стержне по рис. 2-18, а. Прессовка стержней бандажами из стеклоленты по рис. 2-14, б и ярм — стальными балками по рис. 2-15, а. Материал магнитной системы — холоднокатаная текстурованная рулонная сталь марки Э330А с толщиной 0,35 мм с ценой 0,456 руб/кг. Индукция в стержне $B_c = 1,62$ Т (по табл. 2-9). В сечении стержня 8 ступеней, коэффициент заполнения круга $k_{кр} = 0,925$ (табл. 2-1); изоляция пластин — жаростойкое покрытие с однократной лакировкой $k_s = 0,93$ (табл. 2-6); $k_c = k_{кр} k_s = 0,925 \cdot 0,930 = 0,860$. Ярмо многоступенчатое, число ступеней 6, коэффициент усиления ярма $k_{я} = 1,02$ (табл. 8-1 и 8-2). Индукция в ярме $B_{я} = B_c / 1,02 = 1,588$ Т. Число зазоров в магнитной системе на косом стыке 4, на прямом 3. Индукция в зазоре на прямом стыке $B'_s = B_c = 1,62$ Т; на косом стыке $B'_s = B_c / \sqrt{2} = 1,62 / \sqrt{2} = 1,146$ Т.

Удельные потери в стали: $p_c = 1,38$ Вт/кг; $p_{я} = 1,29$ Вт/кг. Удельная намагничивающая мощность: $q_c = 3,12$ В·А/кг; $q_{я} = 2,69$ В·А/кг; для зазоров прямых стыков $q'_s = 3,51$ В·А/см²; для зазоров косых стыков $q'_s = 0,158$ В·А/см²;

По табл. 3-6 находим коэффициент, учитывающий отношение основных потерь в обмотках к потерям короткого замыкания $k_d = 0,91$ и по табл. 3-4 и 3-5 постоянные коэффициенты для медных обмоток $a = 1,40$ и $b = 0,28$. Принимаем $k_p = 0,95$. Диапазон изменения β от 1,2 до 3,6 (табл. 12-1).

Расчет основных коэффициентов

По формулам (3-30), (3-35), (3-36), (3-43), (3-44), (3-52) и (3-65) находим коэффициенты:

$$A = 16 \sqrt{\frac{S' a_p k_p}{f_{\mu_p} B_c^2 k_c^2}} = 16 \sqrt{\frac{533,3 \cdot 5,20 \cdot 0,95}{50 \cdot 6,4 \cdot 1,62^2 \cdot 0,86^2}} = 22,96;$$

$$A_1 = 5,66 \cdot 10^{-2} a A^3 k_c = 5,66 \cdot 10^{-2} \cdot 1,40 \cdot 22,96^3 \cdot 0,86 = 825 \text{ кг} ;$$

$$A_2 = 3,60 \cdot 10^{-2} A^2 k_c l_0 = 3,60 \cdot 10^{-2} \cdot 22,96^2 \cdot 0,86 \cdot 7,5 = 122,4 \text{ кг} ;$$

$$B_1 = 2,40 \cdot 10^{-2} k_c k_{я} A^3 (a + b + e) =$$

$$= 2,40 \cdot 10^{-2} \cdot 0,86 \cdot 1,02 \cdot 22,96^3 (1,40 + 0,28 + 0,411) = 532,9 \text{ кг} ;$$

$$B_2 = 2,40 \cdot 10^{-2} k_c k_{\pi} A^2 (a_{12} + a_{22}) = \\ = 2,40 \cdot 10^{-2} \cdot 0,86 \cdot 1,02 \cdot 22,96^2 (2,7 + 3,0) = 63,3 \text{ кг.}$$

$$C_1 = K_0 \frac{S a^2}{k_d k_c^2 B_c^2 u_a A^2} = 2,46 \cdot 10^2 \frac{1600 \cdot 1,40^2}{0,91 \cdot 0,86^2 \cdot 1,62^2 \cdot 1,125 \cdot 22,96^2} = \\ = 736,4 \text{ кг;}$$

$$M = 0,2453 \cdot 10^{-4} k_{\kappa.s}^2 k_d k_p \frac{P_{\kappa}}{a A} = \\ = 0,2453 \cdot 10^{-4} \cdot 34,2^2 \cdot 0,91 \cdot 0,95 \frac{18\,000}{1,40 \cdot 22,96} = 13,89 \text{ МПа;}$$

$$k_{\kappa.s} = 1,41 \frac{100}{u_{\kappa}} \left(1 + e^{-\frac{\pi u_a}{u_p}} \right) = 1,41 \frac{100}{6,5} \left(1 + e^{-\frac{\pi \cdot 1,125}{6,4}} \right) = 34,2.$$

Минимальная стоимость активной части трансформатора имеет место при условиях, определяемых уравнением (3-55). Для рассчитываемого трансформатора:

$$B = \frac{2}{3} \frac{A_2 + B_2}{B_1} = \frac{2}{3} \frac{122,4 + 63,3}{532,9} = 0,232;$$

$$k_{o.c} = 2,21 \text{ (табл. 3-7);}$$

$$C = \frac{A_1}{3B_1} = \frac{825}{3 \cdot 532,9} = 0,516; k_{н.р} = 1,06;$$

$$D = \frac{2}{3} \frac{C_1}{B_1} k_{o.c} k_{н.р} = \frac{2}{3} \frac{736,4}{532,9} 2,21 \cdot 1,06 = 2,16;$$

$$x^5 + 0,232x^4 - 0,516x - 2,16 = 0.$$

Решение этого уравнения дает $\beta = 1,96$, соответствующее минимальному $C'_{a.ч}$.

По (3-61) и (3-66) находим предельные значения β по допустимым значениям плотности тока Δ и растягивающим механическим напряжениям σ_p :

$$x_{\Delta} \leq 4,5 \sqrt{\frac{2,4 \cdot 736,4}{0,91 \cdot 18\,000}} = 1,46; \beta_{\Delta} = x_{\Delta}^4 = 1,46^4 = 4,56;$$

$$x_{\sigma} \leq \sqrt[3]{\frac{60}{13,89}} = 1,63; \beta_{\sigma} = 1,63^4 = 7,04.$$

Оба полученных значения β лежат за пределами обычно применяемых. Масса одного угла магнитной системы по (3-45')

$$G_y = 0,493 \cdot 10^{-2} k_c k_{\text{я}} A^3 x^3 = \\ = 0,493 \cdot 10^{-2} \cdot 0,86 \cdot 1,02 \cdot 22,96^3 x^3 = 52,35 x^3.$$

Активное сечение стержня по (3-59)

$$P_c = 0,785 k_c A^2 x^2 = 0,785 \cdot 0,86 \cdot 22,96^2 x^2 = 355,9 x^2.$$

Площадь зазора на прямом стыке $P'_3 = P_c = 355,9 x^2$; на косом стыке $P'_3 = P_c \sqrt{2} = 503,48 x^2$.

Потери холостого хода по формуле (8-32)

$$P_x = k_{\text{п.д}} p_c \left(G_c + G_y \frac{k_{y.\text{п}}}{2} \right) + k_{\text{п.д}} p_{\text{я}} \times \\ \times \left[G_{\text{я}} - (k_{\phi} + 2) G_y + \frac{k_{y.\text{п}}}{2} G_y \right] = 1,08 \cdot 1,38 \times \\ \times \left(G_c + G_y \frac{8,92}{2} \right) + 1,08 \cdot 1,29 \left(G_{\text{я}} - 6G_y + \right. \\ \left. + \frac{8,92 G_y}{2} \right) = 1,49 G_c + 1,393 G_{\text{я}} + 4,50 G_y.$$

Намагничивающая мощность по формуле (8-44)

$$Q_x = k'_{\text{т.д}} k''_{\text{т.у}} q_c \left(G_c + \frac{k_{y.\text{т}}}{2} G_y \right) + k'_{\text{т.д}} k''_{\text{т.д}} q_{\text{я}} \times \\ \times \left[G_{\text{я}} - (k_{\phi} + 2) G_y + \frac{k_{y.\text{т}}}{2} G_y \right] + k'_{\text{т.д}} \Sigma q_3 n_3 P_3 = \\ = 1,21 \cdot 3,12 \left(G_c + \frac{32}{2} G_y \right) + 1,21 \cdot 2,69 \times \\ \times \left(G_{\text{я}} - 6G_y + \frac{32}{2} G_y \right) + 1,08 (0,158 \cdot 4 \cdot 503,4 + \\ + 3,51 \cdot 3 \cdot 355,9) x^2 = 3,775 G_c + 3,225 G_{\text{я}} + 92,65 G_y + 4298 x^2.$$

Далее определяются основные размеры трансформатора:

$$d = Ax; d_{12} = aAx; l = \frac{\pi d_{12}}{\beta}; 2a_2 = bd; C = d_{12} + a_{12} + 2a_2 + a_{22}.$$

Весь дальнейший расчет, начиная с определения массы стали магнитной системы, для пяти различных значений β (от 1,2 до 3,6) проводится в форме табл. 3-8.

Предварительный расчет трансформатора ТМ-1600/35
с плоской шихтованной магнитной системой и медными обмотками

β	1,2	1,8	2,4	3,0	3,6
$x = \sqrt[4]{\beta}$	1,048	1,16	1,245	1,32	1,38
$x^2 = \sqrt{\beta^2}$	1,096	1,344	1,55	1,734	1,90
$x^3 = \sqrt[4]{\beta^3}$	1,148	1,56	1,93	2,29	2,62
$A_1/x = 825/x$	788,2	712,3	662,8	626,9	598,9
$A^2x^2 = 122,4 x^2$	134,1	164,2	189,6	212,0	232,2
$G_c = \frac{A_1}{x} + A_2x^2$	922,3	876,5	852,4	838,9	831,1
$B_1x^3 = 532,9 x^3$	611,0	828,2	1027,6	1214,8	1392,8
$B_2x^2 = 63,3 x^2$	69,3	84,3	98,1	109,6	120,1
$G_{\pi} = B_1x^3 + B_2x^2$	680,3	912,5	1125,7	1324,4	1512,9
$G_{CT} = G_c + G_{\pi}$	1602,6	1789,0	1978,1	2163,3	2344,0
$G_y = 52,35 x^3$	60,0	81,4	100,9	119,3	136,8
$1,49G_c$	1374	1306	1270	1250	1238
$1,393G_{\pi}$	948	1271	1568	1845	2108
$4,50G_y$	270	366	454	536	624
$P_x = 1,49G_c + 1,393G_{\pi} + 4,50G_y$	2592	2943	3290	3631	3970
$\Pi_c = 355,9x^2$	389,9	477,5	551,4	616,4	675,3
$3,775G_c$	3482	3309	3218	3167	3138
$3,225G_{\pi}$	2214	2970	3664	4311	4924
$92,69G_y$	5561	7538	9346	11056	12676
$4298x^2$	4709	5767	6659	7445	8156
Q_x	15966	19584	22887	25979	28894
$i_{o.p} = \frac{Q_x}{10S}, \%$	0,998	1,224	1,430	1,620	1,806

β	1,2	1,8	2,4	3,0	3,6
$G_0 = \frac{C_1}{x^2} = \frac{736,4}{x^2}$	672,2	548,9	475,3	425,2	388,1
$1,03G_0$	692,4	565,4	489,6	438,0	399,7
$1,03 \cdot 1,03G_0 = G_{np}$	712,6	581,9	503,9	450,8	411,3
$k_{o.c} G_{np} = 2,21G_{np}$	1575	1286	1114	996	909
$C'_{a.ч} = k_{o.c} G_{np} + G_{ст}$	3177	3075	3092	3159	3253
$\Delta = \sqrt{\frac{0,91 \cdot 18\,000}{2,4G_0}}$	3,186	3,526	3,789	4,007	4,193
$\sigma_p = Mx^3 = 13,89x^3$	15,93	21,59	26,78	31,66	36,30
$d = Ax = 22,96x$	24,03	26,60	28,58	30,22	31,63
$d_{12} = ad = 1,40d$	33,65	37,24	40,01	42,31	44,28
$l = \pi d_{12} / \beta$	88,08	64,99	52,38	44,30	38,64
$C = d_{12} + a_{12} + 2a_2 + a_{22}$	46,08	50,39	53,73	56,47	58,84

Вариант II_A

В целях уменьшения расхода активной стали и потерь холостого хода выбираем пространственную стыковую магнитную систему по рис. 2-7, а, обмотки из алюминиевого провода.

Определение исходных данных расчета

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = 1,25k \sqrt[4]{S'} = 1,25 \cdot 0,55 \cdot 0,9 \sqrt[4]{533,3} =$$

$$= 3,0 \text{ см (табл. 3-3);}$$

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} = 3,0 + 3,0 = 6,0, \text{ см (табл. 4-5, прим. 1).}$$

Активная составляющая напряжения короткого замыкания

$$u_a = \frac{P_K}{10S} = \frac{16\,200}{10 \cdot 1600} = 1,013\%$$

реактивная составляющая

$$u_p = \sqrt{u_K^2 - u_a^2} = \sqrt{6,5^2 - 1,013^2} = 6,42\%$$

Согласно с указаниями в § 2-2 выбираем пространственную стыковую магнитную систему по рис. 2-7, а со стержнями, собираемыми

из плоских пластин и ярмами, навитыми из стальной ленты. Прессовка стержней — бандажами из стеклоленты и ярм — специальными прессующими балками.

Материал магнитной системы холоднокатаная текстурованная рулонная сталь марки Э330А с толщиной 0,35 мм с ценой 0,456 руб/кг. Индукция в стержне $B_c = 1,62$ Т (по табл. 2-9). В сечении стержня восемь ступеней, коэффициент заполнения круга $k_{кр} = 0,925 - 0,02 = 0,905$ (табл. 2-1, примечание 3), изоляция пластин — жаростойкое покрытие с однократной лакировкой $k_a = 0,93$ (табл. 2-6); $k_c = k_{кр} k_a = 0,905 \cdot 0,930 = 0,842$. Ярмо навитое, с сечением прямоугольной формы, сталь ярма не покрывается лаковой пленкой и отжигается после навивки. Коэффициент, определяющий отношение активного сечения ярма к активному сечению стержня, $k_{я} = 1/\sqrt{3}$. При этом индукция в стыке стержня и ярма и первая гармоническая индукции в ярме равны индукции в стержне $B_{я} \approx B_c$.

Удельные потери в стали $p_{ст} = p_{я} = 1,38$ Вт/кг, удельная намагничивающая мощность для стержня и ярма $q_c = q_{я} = 3,12$ В·А/кг.

По табл. 3-6 находим коэффициент, учитывающий отношение основных потерь в обмотках к потерям короткого замыкания $k_d = 0,91$ и по табл. 3-4 и 3-5 постоянные коэффициенты для алюминиевых обмоток $a = 1,06$, $1,42 = 1,505$ и $b = 1,25$, $0,30 = 0,375$. Принимаем $k_p = 0,95$. Диапазон изменения величины β от 1,2 до 3,6 (табл. 12-1).

Расчет основных коэффициентов

По формулам (3-30), (3-35), (3-36), (3-43'''), (3-44'''), (3-52) и (3-65') находим коэффициенты:

$$A = 16 \sqrt[4]{\frac{S' a_p k_p}{f u_p B_c^2 k_c^2}} = 16 \sqrt[4]{\frac{533,3 \cdot 6,00 \cdot 0,95}{50 \cdot 6,42 \cdot 1,62^2 \cdot 0,842^2}} = 24,03;$$

$$A_1 = 5,66 \cdot 10^{-2} a A^3 k_c = 5,66 \cdot 10^{-2} \cdot 1,505 \cdot 24,03^3 \cdot 0,842 = 995,5 \text{ кг};$$

$$A_2 = 3,60 \cdot 10^{-2} A^2 k_c l_0 = 3,60 \cdot 10^{-2} \cdot 24,03^2 \cdot 0,842 \cdot 7,5 = 131,3 \text{ кг};$$

$$B_1 = 3,605 \cdot 10^{-2} k_c k_{я} A^3 (a + b + e) = \\ = 3,605 \cdot 10^{-2} \cdot 0,842 \frac{1}{\sqrt{3}} 24,03^3 (1,505 + 0,375 + 0,178) = 500,6 \text{ кг};$$

$$B_2 = 3,605 \cdot 10^{-2} k_c k_{я} A^2 (a_{12} + a_{22}) = \\ = 3,605 \cdot 10^{-2} \cdot 0,842 \frac{1}{\sqrt{3}} 24,03^2 (3,0 + 3,0) = 57,69 \text{ кг}.$$

$$C_1 = K_0 \frac{S a^2}{k_d k_c^2 B_c^2 u_a A^2} = \\ = 1,20 \cdot 10^2 \frac{1600 \cdot 1,505^2}{0,91 \cdot 0,842^2 \cdot 1,62^2 \cdot 1,013 \cdot 24,03^2} = 439,3 \text{ кг};$$

$$M = 0,1519 \cdot 10^{-4} k_{\kappa.3}^2 k_d k_p \frac{P_{\kappa}}{\alpha A} =$$

$$= 0,1519 \cdot 10^{-4} \cdot 34,9^2 \cdot 0,91 \cdot 0,95 \frac{16 \cdot 200}{1,505 \cdot 24,03} = 7,166 \text{ МПа};$$

$$k_{\kappa.3} = 1,41 \frac{100}{u_{\kappa}} \left(1 + e^{-\frac{\pi u_a}{u_p}} \right) = 1,41 \frac{100}{6,5} \left(1 + e^{-\frac{\pi \cdot 1,013}{6,42}} \right) = 34,9.$$

Минимальная стоимость активной части трансформатора имеет место при условиях, определяемых уравнением (3-55). Для рассчитываемого трансформатора:

$$B = \frac{2(A_2 + B_2)}{3B_1} = \frac{2}{3} \frac{131,3 + 57,7}{500,6} = 0,252;$$

$$k_{o.c} = 2,42 \text{ (табл. 3-7);}$$

$$C = \frac{A_1}{3B_1} = \frac{995,5}{3 \cdot 500,6} = 0,663; \quad k_{н.р} = 1,13;$$

$$D = \frac{2}{3} \frac{C_1}{B_1} k_{o.c} k_{н.р} = \frac{2}{3} \frac{439,3}{500,6} 2,42 \cdot 1,13 = 1,6;$$

$$x^5 + 0,252x^4 - 0,663x - 1,6 = 0.$$

Решение этого уравнения дает $\beta = 1,7$, соответствующую минимальной стоимости активной части.

По (3-61) и (3-66) находим предельные значения β по допустимым значениям плотности тока Δ и растягивающим механическим напряжениям σ_p :

$$x_{\Delta} \leq 2,7 \sqrt{\frac{12,75 \cdot 439,3}{0,91 \cdot 16 \cdot 200}} = 1,66; \quad \beta_{\Delta} = x_{\Delta}^4 = 1,66^4 = 7,67;$$

$$x_{\sigma} \leq \sqrt[3]{\frac{25}{7,166}} = 1,51; \quad \beta_{\sigma} = x_{\sigma}^4 = 1,51^4 = 5,2.$$

Оба полученных значения β лежат за пределами обычно применяемых.

Масса одного угла магнитной системы в навитом ярме по (3-45''):

$$\begin{aligned} G_y &= 0,435 \cdot 10^{-2} k_c k_{\kappa} A^3 x^3 = \\ &= 0,435 \cdot 10^{-2} \cdot 0,842 \frac{1}{\sqrt{3}} 24,03^3 x^3 = 29,35 x^3. \end{aligned}$$

Активное сечение стержня

$$P_0 = 0,785 k_c A^2 x^2 = 0,785 \cdot 0,842 \cdot 24,03^2 x^2 = 381,9 x^2.$$

Площадь зазора $\Pi_3 = \Pi_4 = 381,9 \text{ х}^2$.

Потери холостого хода по формуле (8-38) при $B_c = B_{\text{нл}} = 1,62 \text{ Т}$ с коэффициентами по табл. 8-7 с линейной интерполяцией:

$$P_x = k'_c G_c + k'_y G_y + k'_y G_y = 1,515 G_c + 1,73 G_y + 6,78 G_y.$$

Намагничивающая мощность по формуле (8-46)

$$Q_x = q_c G_c + q_y G_y + (k''_{\text{т.у}} q_y - q_y) 6 G_y + 7,5 \cdot 10^2 \delta \Pi_c B_c^2.$$

Принимая $B_c = B_{\text{нл}} = 1,62 \text{ Т}$; $q_c = q_y = 3,12 \text{ В} \cdot \text{А/кг}$; $B_y = 0,87 \frac{B_c + B_y}{2} = 0,87 \cdot 1,62 = 1,409 \text{ Т}$ по (8-35); $q_y = 1,67 \text{ В} \cdot \text{А/кг}$ (по табл. 8-11); $\delta = 0,0225 \text{ см}$; $\Pi_c = 381,9 \text{ х}^2$; $k''_{\text{т.у}} = 3,94$ (по табл. 8-10 с интерполяцией для $B_y = 1,409 \text{ Т}$, получаем:

$$Q_x = 3,12 G_{\text{ст}} + (3,94 \cdot 1,67 - 3,12) 6 G_y + 7,5 \cdot 10^2 \cdot 0,0225 \cdot 381,9 \cdot 1,62^2 \text{ х}^2 = 3,12 G_{\text{ст}} + 20,76 G_y + 16 915 \text{ х}^2.$$

Далее определяются основные размеры трансформатора:

$$d = Ax; \quad d_{12} = aAx; \quad l = \pi d_{12} / \beta;$$

$$2a_2 = bd \text{ и } C = d_{12} + a_{12} + 2a_2 + a_{22}.$$

Без дальнейший расчет, начиная с определения массы стали магнитной системы, для пяти различных значений β (от 1,2 до 3,6) проводится в форме табл. 3-9.

Результаты расчетов, приведенные в табл. 3-8 и 3-9, показаны в виде графиков на рис. 3-8 — 3-13.

Параллельно с расчетом варианта $I_{\text{м}}$ — трансформатора с медными обмотками был также проведен расчет этого трансформатора той же конструкции с теми же исходными данными и теми же заданными параметрами холостого хода и короткого замыкания, но с обмотками из алюминиевого провода — вариант $I_{\text{А}}$. Результаты этого расчета приведены только в виде графиков на рис. 3-8 — 3-13.

Графики, показанные на рис. 3-8 для вариантов $I_{\text{м}}$, $I_{\text{А}}$ и $II_{\text{А}}$, позволяют заметить, что с ростом значения β масса металла обмоток G_0 и масса стали в стержнях G_c уменьшаются, а масса стали в ярмах G_y и общая масса стали $G_{\text{ст}}$ трансформатора возрастают. Общая стоимость активной части $C'_{\text{а.ч}}$ (рис. 3-9) с ростом β сначала падает, а затем, пройдя через минимальное значение, снова возрастает. Поскольку с увеличением β при сохранении индукции B_c общая масса стали возрастает, должны возрастать также потери и ток холостого хода, что подтверждается графиками P_x и i_0 на рис. 3-10.

Уменьшение массы металла обмоток с ростом β при сохранении потерь короткого замыкания приводит к

**Предварительный расчёт трансформатора ТМ-1600/35
с пространственной магнитной системой и алюминиевыми обмотками**

β	1,2	1,8	2,4	3,0	3,6
$x = \sqrt[4]{\beta}$	1,048	1,16	1,245	1,32	1,38
$x^2 = \sqrt{\beta^2}$	1,096	1,344	1,55	1,734	1,90
$x^3 = \sqrt[4]{\beta^3}$	1,148	1,56	1,93	2,29	2,62
$A_1/x = 995,5/x$	951,1	859,4	799,8	756,4	722,7
$A_2x^2 = 131,3x^2$	143,8	176,2	203,4	217,2	249,1
$G_c = A_1/x + A_2x^2$	1094,9	1035,6	1003,2	973,6	971,8
$B_1x^3 = 500,6x^3$	573,9	777,9	965,3	1141,0	1309,0
$B_2x^2 = 57,69x^2$	63,2	77,4	89,4	99,9	109,5
$G_{\pi} = B_1x^3 + B_2x^2$	637,1	855,3	1054,7	1240,9	1418,5
$G_{CT} = G_c + G_{\pi}$	1732,0	1890,9	2057,9	2214,5	2390,3
$G_y = 29,35x^2$	33,65	45,61	56,6	66,89	76,71
$1,515G_c$	1659	1569	1520	1475	1472
$1,73G_{\pi}$	1102	1480	1842	2147	2398
$6,78G_y$	228	309	384	454	520
$P_x = 1,515G_c + 1,73G_{\pi} + 6,78G_y$	2989	3358	3746	4076	4390
$\Pi_c = 381,9x^2$	418,4	512,4	591,6	631,7	724,6
$3,12G_{CT}$	5404	5900	6420	6909	7457
$20,76G_y$	699	947	1175	1389	1592
$16\,915x^2$	18\,530	22\,690	26\,200	29\,300	32\,090
$Q_x = 3,12G_{CT} + 20,76G_y + 16\,915x^2$	24\,633	29\,537	33\,795	37\,598	41\,139
$i_0 = \frac{Q_x}{10S}, \%$	1,540	1,846	2,112	2,350	2,571
$G_o = \frac{C_1}{x^2} = 439,3/x^2$	400,8	327,2	283,4	253,5	231,4

β	1,2	1,8	2,4	3,0	3,6
$1,03G_0$	412,8	337,0	291,9	261,1	238,3
$1,03 \cdot 10G_0 = G_{np}$	452,9	369,8	320,2	286,4	261,5
$k_{o.c}G_{np} = 2,42G_{np}$	1096	894,9	775,0	693,2	632,8
$C'_{a.ч} = k_{o.c}G_{np} + G_{ст}$	2828	2785,8	2832,9	2907,7	3023,1
$\Delta = \sqrt{\frac{0,91 \cdot 16 \cdot 200}{12,75 \cdot G_0}}$	1,699	1,88	2,02	2,136	2,235
$\sigma_p = Mx^3 = 7,166x^3$	8,22	11,1	13,8	16,3	18,7
$d = Ax = 24,03x$	25,15	27,84	29,91	31,63	33,10
$d_{12} = ad = 1,505d$	37,86	41,89	45,01	47,60	49,82
$l = \frac{\pi d_{12}}{\beta}$	99,11	73,12	58,92	49,85	43,48
$C = d_{12} + a_{12} + 2a_2 + a_{22}$	52,99	58,03	61,92	65,16	67,94

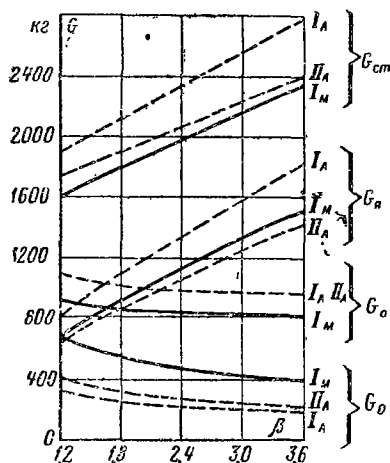


Рис. 3-8. Изменение массы стали стержней G_c , ярем $G_{я}$ и магнитной системы $G_{ст}$ с изменением β для трансформатора ТМ-1600/35 с медными (I_m) и алюминиевыми (I_a и II_a) обмотками.

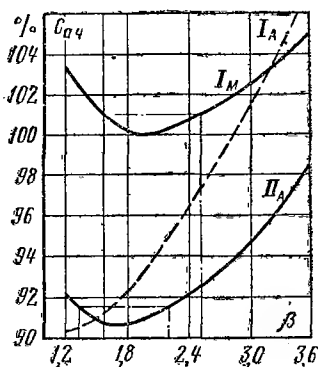


Рис. 3-9. Изменение относительной стоимости активной части с изменением β для трансформатора ТМ-1600/35 с медными (I_m) и алюминиевыми (I_a и II_a) обмотками.

уменьшению сечения как всей обмотки, так и каждого ее витка, а следовательно, к увеличению плотности тока и механических напряжений от растяжения в обмотках при коротком замыкании трансформатора. Рост плотности тока Δ и напряжений от растяжения в проводе обмоток σ_p для рассчитанного трансформатора виден из графиков, показанных на рис. 3-11.

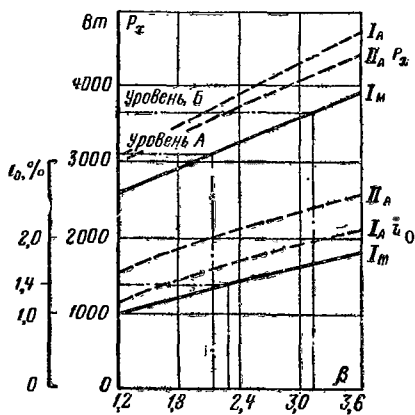


Рис. 3-10. Изменение потерь и тока холостого хода с изменением β для трансформатора ТМ-1600/35 с медными (I_A) и алюминиевыми (I_{Al} и I_{Al}) обмотками.

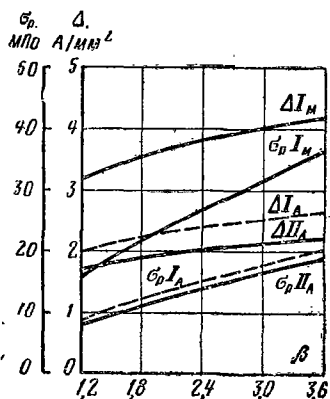


Рис. 3-11. Изменение плотности тока и механических напряжений при растяжении для трансформатора ТМ-1600/35 с медными (I_M) и алюминиевыми (I_{Al} и I_{Al}) обмотками.

Принципиальные выводы в отношении характера изменения масс активных материалов, стоимости активной части, потерь и тока холостого хода, плотности тока и механических напряжений от растяжения с изменением соотношения размеров β , сделанные на основании графиков рис. 3-8 — 3-11, являются общими для всех трех вариантов расчета трансформатора с медными и алюминиевыми обмотками, с плоской и пространственной магнитной системой.

Различие в результатах расчета трансформатора с медными и алюминиевыми обмотками можно определить путем сравнения графиков для вариантов I_M и I_A , рассчитанных для одинаковых параметров холостого хода и короткого замыкания при одинаковых конструкциях

магнитной системы и обмоток. При переходе от меди к алюминию и при сохранении потерь короткого замыкания вследствие более высокого, чем у меди, удельного сопротивления алюминия, радиальные размеры обмоток (a_1, a_2) и соответствующие коэффициенты (a, b) увеличиваются. Это ведет к увеличению коэффициентов A_1, A_2, B_1, B_2 и к увеличению при равных значениях β массы стали по сравнению с трансформатором, имеющим медные обмотки. Поэтому графики $G_{\text{ста}}=f(\beta)$; $P_{\text{ха}}=f(\beta)$ и $i_{0\text{а}}=f(\beta)$ располагаются выше соответствующих графиков для трансформатора с медными обмотками. Поскольку общий объем и поперечное сечение алюминиевых обмоток больше, чем у медных, графики $\Delta_{\text{а}}=f(\beta)$ и $\sigma_{\text{р}}=f(\beta)$ располагаются ниже, чем у трансформатора с медными обмотками. При этом общий характер всех графиков $G_{\text{ста}}, G_{0\text{а}}, P_{\text{ха}}, i_{0\text{а}}, \Delta_{\text{а}}, \sigma_{\text{ра}}$ остается таким же, как у соответствующих графиков трансформатора с медными обмотками.

Ранее было найдено $\beta=1,96$, соответствующее минимальной стоимости активной части трансформатора варианта $I_{\text{м}}$ с медными обмотками. График $C'_{\text{а.ч}}$ на рис. 3-9 позволяет установить, что при изменении β в широких пределах от 1,57 до 2,52 стоимость активной части отличается от минимума не более, чем на 1%.

Широкий диапазон значений β , практически обеспечивающий получение минимальной стоимости активной части трансформатора $C'_{\text{а.ч}}$ с отклонением от минимума не более чем на 1%, еще не определяет оптимального значения β . Для выбора оптимального β необходимо обратиться к другим критериям. Графики на рис. 3-10 позволяют определить предельные значения β для потерь холостого хода, соответствующих согласно ГОСТ 11920-73 уровню А (3100 Вт) $\beta \leq 2,14$ и уровню Б (3650 Вт) $\beta \leq 3,12$. Предельное значение по току холостого хода $i_0=1,4\%$ составляет $\beta \leq 2,3$. Ранее были установлены предельные значения, ограниченные плотностью тока $\beta \leq 4,56$ и механической прочностью обмоток при коротком замыкании $\beta \leq 7,04$. Полученные по этим критериям предельные значения сведены для всех трех вариантов в табл. 3-10 и графически представлены на рис. 3-12.

На этом рисунке заштрихованы те зоны, в которых данный параметр выходит за пределы, установленные для него ГОСТ или заданными условиями. Выбор зна-

Предельные значения β , полученные в предварительном расчете

Вариант	Пределы β по:					
	$C_{а. ч. мин}^*$	P_x уровень А	P_x уровень Б	i_0	Δ	σ_p
I_M	1,57—2,52	2,14	3,12	2,3	4,56	7,04
I_A	0,8—1,58	1,20	2,00	1,7	4,28	4,8
Π_A	1,32—2,2	1,35	2,28	1,65*	7,67	5,2

* Для варианта Π_A с пространственной магнитной системой ток холостого хода на 30% выше нормы ГОСТ 11920-73.

чений β и диаметра стержня возможен только в пределах всех незаштрихованных зон.

График на рис. 3-12, а позволяет для трансформатора с медными обмотками определить оптимальное значение β с учетом всех исследованных критериев. Из этого графика следует, что верхнее предельное значение $\beta=2,3$ для данного трансформатора определяется по току холостого хода при потерях холостого хода ниже уровня Б. На этом же графике нанесены линии, соответствующие нормализованным диаметрам стержня от 24 до 32 см. Учитывая желательность получения стоимости активной части, близкой к минимальной, выбираем нормализованный диаметр $d=28$ см при $\beta=2,22$. При этом потери холостого хода будут отличаться от потерь уровня А по ГОСТ не более чем на 100 Вт.

Минимальная стоимость активной части того же трансформатора с алюминиевыми обмотками — вариант I_A — по графику рис. 3-9 составляет 90,4% соответствующего значения для варианта с медными обмотками и точка минимума сдвигается к значению $\beta=1,2$. По графику рис. 3-12, б возможен выбор нормализованного диаметра стержня $d=26$ см при $\beta=1,42$. Потери холостого хода при этом будут ниже уровня Б, но превысят уровень А на 200 Вт, ток холостого хода составит 0,9 значения, установленного ГОСТ, а стоимость активной части 90,8% минимальной стоимости для варианта I_M .

Трансформатор с алюминиевыми обмотками варианта Π_A отличается от вариантов I_M и I_A конструкцией пространственной магнитной системы и тем, что потери короткого замыкания заданы при расчете на 10% ниже,

$\beta =$	1	2	3	4	5	6	
$C_{a,ч}$	hatched		hatched	hatched	hatched	hatched	$C_{a,ч} > 1,01 C_{мин}$
P_x			hatched	hatched	hatched	hatched	$P_x > \text{уровень А}$
P_x				hatched	hatched	hatched	$P_x > \text{уровень Б}$
l_0			hatched	hatched	hatched	hatched	$l_0 > \text{ГОСТ}$
Δ					hatched	hatched	$\Delta > 4,5 \text{ А/мм}^2$
σ_p							$\sigma_p > 60 \text{ МПа}$

$d = 24 \quad 26 \quad 28 \quad 30 \quad 32 \text{ см}$

а)

$\beta =$	1,0	2	3	4	5	6	
$C_{a,ч}$		hatched	hatched	hatched	hatched	hatched	$C_{a,ч} > 1,01 C_{мин}$
P_x	hatched	hatched	hatched	hatched	hatched	hatched	$P_x > \text{уровень А}$
P_x		hatched	hatched	hatched	hatched	hatched	$P_x > \text{уровень Б}$
l_0		hatched	hatched	hatched	hatched	hatched	$l_0 > \text{ГОСТ}$
Δ				hatched	hatched	hatched	$\Delta > 2,7 \text{ А/мм}^2$
σ_p					hatched	hatched	$\sigma_p > 25 \text{ МПа}$

$d = 24 \quad 26 \quad 28 \quad 30 \quad 32 \text{ см}$

б)

$\beta =$	1	2	3	4	5	6	
$C_{a,ч}$	hatched		hatched	hatched	hatched	hatched	$C_{a,ч} > 1,01 C_{мин}$
P_x		hatched	hatched	hatched	hatched	hatched	$P_x > \text{уровень А}$
P_x			hatched	hatched	hatched	hatched	$P_x > \text{уровень Б}$
l_0		hatched	hatched	hatched	hatched	hatched	$l_0 > \text{ГОСТ}$
Δ							$\Delta > 2,7 \text{ А/мм}^2$
σ_p					hatched	hatched	$\sigma_p > 25 \text{ МПа}$

$d = 24 \quad 26 \quad 28 \quad 30 \quad 32 \text{ см}$

в)

Рис. 3-12. Определение оптимального значения β и диаметра стержня d для трансформатора ТМ-1600/35 с медными (а) и алюминиевыми (б — вариант I_A и в — вариант II_A) обмотками.

чем в двух других вариантах. Переход на пространственную магнитную систему позволяет уменьшить массу стали ярм за счет уменьшения сечения ярма, а снижение заданных потерь короткого замыкания приводит к некоторому увеличению массы металла обмоток, расстояния

между осями стержней и средней длины навитого ярма. В результате совместного влияния этих двух факторов масса стали стержней в этом варианте практически совпадает с массой варианта I_A (алюминиевые обмотки), а масса стали ярм оказывается меньшей, чем в этом варианте и варианте I_M (медные обмотки) (рис. 3-8). Общая масса стали при одинаковых значениях β на 2—8% превышает массу стали варианта I_A .

График рис. 3-12, в позволяет выбрать для варианта II_A нормализованный диаметр стержня $d=26$ см при $\beta=1,370$. При этом потери холостого хода не

выходят за уровень А (3100 Вт), ток холостого хода на 18% превышает уровень ГОСТ для плоских шихтованных магнитных систем, но для пространственной стыковой системы является приемлемым. Стоимость активной части составляет 1,01 от минимальной и 0,915 от $C'_{a,ч}$ для варианта I_M с медными обмотками.

Обобщенный метод позволяет рассчитать ряд параметров трансформатора без определения его основных размеров d , l и C , которые также могут быть рассчитаны по формулам (3-29), (3-13) и (3-40). На рис. 3-13 показано изменение этих размеров для трех исследованных вариантов расчета трансформатора.

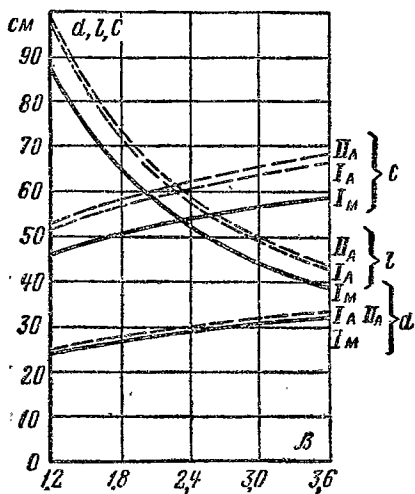


Рис. 3-13. Изменение основных размеров диаметра стержня d , высоты обмотки l и расстояния между осями стержней C с изменением β для трансформатора ТМ-1600/35 с медными (I_M) и алюминиевыми (I_A и II_A) обмотками.

Для выбранных значений d и β рассчитываем и находим по графикам следующие данные трансформаторов примеров § 3-6:

Вариант I_м — медные обмотки: $\beta=2,22$; $x=1,221$; $x^2=1,490$; $x^3=1,819$.

Диаметр стержня $d=A x=22,96 \cdot 1,221=28$ см. Активное сечение стержня $P_c=355,9 x^2=355,9 \cdot 1,490=530,3$ см².

Средний диаметр обмоток $d_{12}=a A x=1,40 \cdot 22,96 \times 1,221=39,24$ см.

Высота обмотки

$$l = \frac{\pi d_{12}}{\beta} = \frac{\pi \cdot 39,24}{2,22} = 55,53 \text{ см.}$$

Высота стержня $l_c=l+2 l_0=55,53+2 \cdot 7,5=70,53$ см.

Расстояние между осями стержней $C=d_{12}+a_{12}+b d+a_{22}=39,24+2,7+0,28 \cdot 28+3,0=52,78$ см.

Электродвижущая сила одного витка $u_B=4,44 f \times B_c P_c \cdot 10^{-4}=4,44 \cdot 50 \cdot 1,62 \cdot 530,3 \cdot 10^{-4}=19,07$ В.

Масса стали $G_{ст}=1922$ кг; масса металла обмоток $G_o=497$ кг; масса провода $G_{пр}=526,8$ кг; плотность тока $\Delta=3,712$ А/мм²; механические напряжения в обмотках $\sigma_p=25,24$ МПа; стоимость активной части $C'_{a,ч}=3080$ условных единиц, в денежном выражении $C_{a,ч}=C'_{a,ч} c_{ст} k_{ст} k_{отх}=3080 \cdot 0,456 \cdot 1,56 \cdot 1,05=2300$ руб.; потери и ток холостого хода: $P_x=3190$ Вт; $i_0=1,37\%$.

Вариант II_а — алюминиевые обмотки: $\beta=1,370$; $x=1,082$; $x^2=1,171$; $x^3=1,266$.

Диаметр стержня $d=24,03 \cdot 1,082=26$ см.

$P_c=381,9 \cdot 1,171=447,1$ см²; $d_{12}=1,505 \cdot 26=39,13$ см;

$$l = \frac{\pi \cdot 39,13}{1,370} = 89,7 \text{ см; } l_c = 89,7 + 2 \cdot 7,5 = 104,7 \text{ см;}$$

$$C = 39,13 + 3,0 + 0,375 \cdot 26 + 3,0 = 54,88 \text{ см;}$$

$$u_B = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,62 \cdot 447,1 \cdot 10^{-4} = 16,08 \text{ В.}$$

Масса стали $G_{ст}=1780$ кг; масса металла обмоток $G_o=386,4$ кг; масса провода $G_{пр}=423,9$ кг; плотность тока $\Delta=1,75$ А/мм²; механические напряжения в обмотках $\sigma_p=9,04$ МПа.

Стоимость активной части $C'_{a,ч}=2816$ условных единиц в денежном выражении $C_{a,ч}=C'_{a,ч} c_{ст} k_{ст} k_{отх}=2816 \times$

$\times 0,456 \cdot 1,56 \cdot 1,05 = 2100$ руб. Потери холостого хода $P_x = 3100$ Вт; ток холостого хода $i_0 = 1,63\%$.

Результаты проведенного в этой главе предварительного расчета и полного расчета двух вариантов трансформатора ТМ-1600/35, проведенного в гл. 6—9, приведены в табл. 3-11. Основные размеры этих трансформаторов показаны на рис. 3-14. Результаты полного расчета

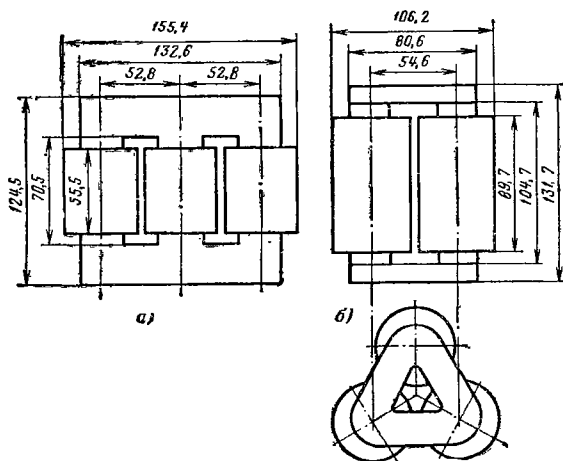


Рис. 3-14. Основные размеры двух трансформаторов ТМ-1600/35 с медными (а) и алюминиевыми (б) обмотками.

достаточно близко подходят к результатам предварительного расчета, что подтверждает возможность использования обобщенного метода расчета для рационального определения оптимальных основных размеров трансформатора.

Необходимо отметить, что в процессе проведения расчета трансформатора по обобщенному методу была получена возможность определения и оценки ряда его параметров — масс активных материалов, параметров холостого хода и других — при предельно возможных изменениях основных размеров активной части. При этом все исследованные варианты имели одинаковые заранее фиксированные параметры короткого замыкания. В гл. 11 будет показана также возможность применения обобщенного метода для исследования влияния исходных

Сравнение данных предварительного и полного расчетов трансформатора ТМ-1600/35

Показатели	Задано	Трансформатор с медными обмотками (I_M)		Трансформатор с алюминиевыми обмотками (II_A)	
		Предварительный расчет	Полный расчет	Предварительный расчет	Полный расчет

Параметры

Полные потери, Вт	21 650*	21 190	20 529	19 300	18 611
	19 300				
Потери короткого замыкания P_k , Вт	18 000*	18 000	17 207	16 200	15 816
	16 200				
Потери холостого хода P_x , Вт	3650*	3190	3322	3100	2795
	3100				
Напряжение короткого замыкания u_k , %	6,5	6,5	6,4	6,5	6,53
Ток холостого хода i_0 , %	1,4*	1,37	1,21	1,63	1,66
	1,8				
Механическое напряжение σ_r , МПа	—	25,24	26	9,04	8,6

Электромагнитные нагрузки

Индукция B_c , Т	1,62	1,62	1,612	1,62	1,605
Плотность тока Δ , А/мм ²	—	3,712	3,605	1,75	1,70

Основные размеры, см

β	—	2,22	2,25	1,37	1,375
Диаметр стержня d	—	28	28	26	26
Средний диаметр d_{12}	—	39,24	39,7	39,13	39,4
Высота обмотки l	—	55,53	55,5	89,7	90
Высота стержня l_c	—	70,53	70,5	104,7	105
Расстояние между осями C	—	52,78	53	54,88	55,4

Показатели	Задано	Трансформатор с медными обмотками (I_M)		Трансформатор с алюминиевыми обмотками (II_A)	
		Предварительный расчет	Полный расчет	Предварительный расчет	Полный расчет

Данные масс и стоимости

Масса стали $G_{ст}$, кг	—	1922	1983	1780	1855
Масса металла обмоток $1,03 G_o$, кг	—	511,9	539,4	386,4	417,3
Стоимость активной части $C_{а.ч.}$, руб.	—	2300	2400	2100	2205

* В числителе данные для варианта I_M , в знаменателе — для варианта II_A .

данных расчета на некоторые параметры трансформатора.

Все вычисления при использовании обобщенного метода для предварительного расчета отдельного трансформатора можно выполнять на счетной линейке или, что дает более точные результаты, путем ручного счета на механической или электронной цифровой вычислительной клавишной машине. Методика этого расчета может быть также запрограммирована для автоматического счета на более сложной машине типа «Проминь» или «Наири».

Подобное исследование, проведенное для ряда трансформаторов современных серий, показало, что общий характер изменения экономических и технических параметров с изменением β отличается теми же закономерностями, что и в разобранный пример с трансформатором типа ТМ-1600/35. Однако для трансформатора каждого типа при этом получаются свои пределы оптимальных значений β .

Анализ серий трансформаторов с медными и алюминиевыми обмотками показал, что для трансформаторов

равной мощности, рассчитанных для стали одной марки при одинаковой индукции, имеющих одинаковые параметры холостого хода и короткого замыкания, могут быть установлены следующие приближенные отношения параметров:

Диаметр стержня магнитной системы	$d_A \approx (0,9 \div 0,95) d_M$
Длина стержня	$l_{cA} \approx (1,4 \div 1,5) l_{cM}$
Расстояние между осями стержней	$C_A \approx (1,0 \div 1,05) C_M$
Высота магнитной системы (стержень и два ярма)	$H_{cA} \approx (1,15 \div 1,3) H_{cM}$
Число витков в обмотке	$w_A \approx (1,25 \div 1,1) w_M$
Масса металла обмоток	$G_{oA} \approx (0,63 \div 0,65) G_{oM}$
Масса стали магнитной системы	$G_{cTA} \approx G_{cTM}$
Плотность тока в обмотках	$\Delta_A \approx (0,55 \div 0,6) \Delta_M$
Растягивающие напряжения в обмотках при коротком замыкании	$\sigma_{pA} \approx (0,36 \div 0,40) \sigma_{pM}$
Плотность теплового потока на поверхности обмоток	$q_A \approx (0,6 \div 0,7) q_M$

Для трансформаторов с алюминиевыми обмотками стоимость активной части обычно получается несколько меньшей, чем для трансформаторов с одинаковыми выходными данными, имеющих медные обмотки. При этом стоимость бака и масла у трансформатора с алюминиевыми обмотками вследствие большей высоты бака превышает стоимость бака и масла трансформатора с медными обмотками. Общая стоимость трансформатора для эквивалентных по мощности, классу напряжения и параметрам холостого хода и короткого замыкания современных трансформаторов с алюминиевыми и медными обмотками обычно оказывается практически равной.

Примеры приближенного расчета двух вариантов трансформатора ТМ-1600/35 показывают, что выбор оптимального значения β для каждого трансформатора определяется рядом условий, а именно заданными параметрами холостого хода и короткого замыкания, т. е. принятым уровнем потерь P_x и P_k и напряжением короткого замыкания u_k , маркой стали магнитной системы и материалом обмоток, выбранными электромагнитными нагрузками активных материалов B_c и Δ и изоляционными расстояниями главной изоляции обмоток. Для того чтобы при расчете трансформатора найти правильное

решение при минимальном объеме работы, рекомендует-ся в каждом случае для выбора β выполнить прибли-женный расчет по методике, показанной в примерах расчета трансформатора ТМ-1600/35 с медными и алю-миниевыми обмотками.

При выполнении приближенного расчета следует от-четливо представлять, что в его результате могут быть получены только ориентировочные основные данные и размеры, которые потребуется подвергнуть некоторой, обычно небольшой, корректировке при подгонке пара-метров рассчитываемого трансформатора к заданным значениям. Эта корректировка может быть необходима как вследствие приближенного определения величин a , $(a_1 + a_2)/3$ и др., так и вследствие необходимости считать-ся при реальном расчете с наличным сортаментом про-вода, особенностями выбранных конструкций обмоток и магнитной системы, нормализованным рядом диамет-ров стержней и т. д.

В ряде случаев при определенном уровне потерь для наиболее часто употребляемых материалов магнитной системы и обмоток, для определения оптимального зна-чения β можно воспользоваться рекомендациями табл. 3-12. В этой таблице приведены оптимальные зна-чения β , полученные в результате исследования масля-ных трансформаторов современных серий с напряжени-ями ВН 6; 10, 35 и 110 кВ, отвечающих требованиям ГОСТ 12022-66, ГОСТ 11920-73 и ГОСТ 12965-74 (§ 1-2), а также рекомендуемые значения β для современных су-хих трансформаторов.

Рекомендуемые значения β предусматривают полу-чение трансформаторов с заданным уровнем потерь, за-данным напряжением короткого замыкания, со стоимо-стью активных материалов, близкой к минимальной, достаточно прочных при коротком замыкании, при усло-вии применения материалов магнитной системы и обмо-ток, указанных в табл. 3-12.

Для однофазных двухобмоточных трансформаторов может быть использована та же таблица. При этом β определяется по табличному значению мощности, равно-му или близкому к утроенной мощности на одном стер-жне однофазного трансформатора.

При выборе β следует учитывать, что уменьшение β при сохранении параметров короткого замыкания ведет к уменьшению массы стали магнитной системы, потерь

Рекомендуемые значения β

а) Масляные трансформаторы

Габарит	Мощность, кВт·А	Алюминий				Медь		
		6 и 10 кВ	35 кВ	110 кВ	6 и 10 кВ	35 кВ	110 кВ	
I	25—100	1,2—1,6	—	—	1,8—2,4	—	—	—
II	160—630	1,2—1,6	1,2—1,5	—	1,8—2,4	1,8—2,4	—	—
III	1000—6300	1,3—1,7	1,2—1,6	—	2,0—2,6	1,8—2,4	—	—
IV	6300—16 000	—	1,1—1,3	1,1—1,3	—	1,7—2,0	1,6—2,0	
IV	25 000—80 000	—	—	—	—	1,3—1,6	1,5—1,8	

б) Сухие трансформаторы

Габарит	Мощность, кВт·А	Алюминий				Медь		
		до 1 кВ	6 и 10 кВ	—	до 1 кВ	6 и 10 кВ	—	
I и II	10—160	1,1—1,5	—	—	1,6—2,2	—	—	—
II	160—630	—	1,2—1,6	—	—	1,8—2,4	—	—
III	1000—1600	—	1,1—1,3	—	—	1,6—2,0	—	—

Примечание. В таблице приведены значения β , рекомендуемые для трехфазных масляных трансформаторов серий 6, 10, 35 и 110 кВ, отвечающих требованиям ГОСТ 12022-66, ГОСТ 11920-73 и ГОСТ 15965-74 (§ 1-2), и для современных трехфазных сухих трансформаторов — сталь марки Э330А-0,35 мм или Э330-0,35 мм по ГОСТ 802-58; $B_c = 1,6 \div 1,65$ Т для масляных и $B_c \approx 1,4 \div 1,6$ Т — для сухих трансформаторов.

и тока холостого хода, а также к увеличению массы металла обмоток. Увеличение β вызывает увеличение массы стали, потерь и тока холостого хода, но ведет к уменьшению массы металла обмоток.

Изменение β влияет не только на массу активных, но и на массу остальных материалов трансформатора. Вместе с увеличением β растут потери холостого хода и стоимость системы охлаждения, возрастают масса и стоимость конструктивных деталей остова, металла бака, трансформаторного масла, общая масса трансформатора. Общая стоимость материалов трансформатора имеет свою точку минимального значения, обычно близкую по шкале значений β к точке минимальной стоимости активных материалов. С увеличением β от этой точки общая стоимость материалов резко возрастает. Поэтому в целях экономии всех материалов трансформатора рекомендуется при прочих равных условиях выбирать меньшие из рекомендуемых значений β .

3-7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРАНСФОРМАТОРА

Расчет основных размеров трансформатора начинается с определения диаметра стержня по (3-17):

$$d = 16 \sqrt[4]{\frac{S' a_p \beta k_p}{f u_p B_c^2 k_c^2}}.$$

Расчет и выбор величин, входящих в (3-17), рекомендуется производить в следующем порядке:

1. Мощность обмоток одного стержня трансформатора, кВт·А, определяется по (3-2):

$$S' = S/c,$$

где S — мощность трансформатора по заданию;

c — число активных (несущих обмотки) стержней трансформатора.

Для трехобмоточного трансформатора S — наибольшая из трех мощностей пар обмоток ВН—СН; ВН—НН и СН—НН, для автотрансформатора — расчетная (типовая мощность).

2. Ширина приведенного канала рассеяния трансформатора $a_p = a_{12} + (a_1 + a_2)/3$ при определении диаметра стержня еще не известна. Размер a_{12} канала между об-

мотками ВН и НН определяется как изоляционный промежуток и может быть выбран на основании указаний, данных в § 4-5 о выборе главной изоляции трансформатора по испытательному напряжению обмотки ВН (табл. 4-5). Для сухих трансформаторов следует пользоваться данными, приведенными в § 4-6.

Радиальные размеры a_1 и a_2 обмоток ВН и НН при определении диаметра стержня могут быть приближенно определены по (3-28) и табл. 3-3 (§ 3-5).

При расчете трехобмоточных трансформаторов по (3-28) в таком же порядке ориентировочно определяется приведенный размер двух внутренних обмоток НН и СН.

Значением $(a_1 + a_2)/3$, найденным по (3-28), можно пользоваться только при определении основных размеров трансформатора. Во всех последующих расчетах следует пользоваться реальными, радиальными размерами обмоток рассчитываемого трансформатора.

3. Значение β приближенно равно отношению средней длины витка двух обмоток l_v трансформатора к их высоте l и определяет соотношение между шириной и высотой трансформатора. В том случае, когда заданные параметры трансформатора и принятые исходные данные расчета совпадают с условиями, для которых составлена табл. 3-12, выбор β может быть сделан по этой таблице с учетом замечаний в § 3-6. Если такого совпадения нет, то рекомендуется выбор оптимального значения β делать на основании предварительного обобщенного расчета по методике, описанной в § 3-5 и 3-6.

При расчете трансформатора с магнитной системой из горячекатаной стали марок Э41; Э42 или Э43, при индукции $B_c = 1,4 \div 1,45$ Т получить трансформатор с потерями и током холостого хода, отвечающим требованиям современного ГОСТ, невозможно. В случае необходимости применения стали этих марок при расчете нестандартного трансформатора рекомендуется провести предварительный расчет по методике, описанной в § 3-5 и 3-6, и выбрать приемлемый вариант или воспользоваться данными, приведенными в табл. 3-12.

4. Коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному полю (коэффициент Роговского) при определении основных размеров можно приближенно принять:

$$k_p \approx 0,95.$$

5. Частота f подставляется из задания на расчет трансформатора.

6. Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %, определяется по формуле

$$u_p = \sqrt{u_k^2 - u_a^2}.$$

В свою очередь напряжение короткого замыкания, %, подставляется из задания, а его активная составляющая, %, определяется по формуле

$$u_a = \frac{P_k}{10S},$$

где P_k — потери короткого замыкания, Вт;

S — полная мощность трансформатора по заданию, кВ·А.

Для трансформаторов мощностью 10 000 кВ·А и более, поскольку для них активная составляющая u_a относительно мала, можно принять $u_p = u_k$. Для трехобмоточных трансформаторов в (3-17) следует подставлять значение $u_p \approx u_k$ для двух внутренних обмоток (НН и СН).

Для автотрансформаторов в (3-17) следует подставлять расчетное напряжение короткого замыкания $u_{к.р}$, определенное в соответствии с указаниями § 3-2.

7. Индукция в стержне B_c выбирается по табл. 2-9 в соответствии с замечаниями, сделанными в § 11-1 и 2-3. В трансформаторах относительно небольшой мощности ($S' < 25$ кВ·А) выбирают обычно пониженную индукцию во избежание получения повышенных значений тока холостого хода. Из этих же соображений не рекомендуется выбирать индукцию выше значений, данных в табл. 2-9. Уменьшение индукции хотя и дает снижение потерь и тока холостого хода, однако приводит к увеличению массы и стоимости активных материалов — стали и металла обмоток.

8. Коэффициент заполнения активным сечением стали площади круга, описанного около сечения стержня k_c , зависит от выбора числа ступеней в сечении стержня, способа прессовки стержня и размеров охлаждающих каналов, толщины листов стали и вида междулистовой изоляции. Общий коэффициент заполнения k_c равен произведению двух коэффициентов

$$k_c = k_{кр} k_3. \quad (3-67)$$

В свою очередь коэффициенты $k_{кр}$ и k_8 могут быть определены по табл. 2-1, 2-2 и 2-6 согласно указаниям, данным в § 2-2, 2-3 и 11-2.

После определения и выбора всех величин, входящих в (3-17), по этой формуле рассчитывается диаметр стержня.

Если полученный диаметр d не соответствует нормализованной шкале диаметров (§ 2-2), то следует принять ближайший диаметр по нормализованной шкале d_n и определить β_n соответствующую нормализованному диаметру. Если β выбрана по методике, описанной в § 3-5 и 3-6, то она пересчитывается по формуле

$$\beta_n = \left(\frac{d_n}{d} \right)^4. \quad (3-68)$$

При выборе β по табл. 3-12 определение производится по формуле

$$\beta_n = \beta \left(\frac{d_n}{d} \right)^4. \quad (3-69)$$

Второй основной размер трансформатора — средний диаметр канала между обмотками d_{12} — может быть предварительно приближенно определен (рис. 3-5) по формуле

$$d_{12} = d + 2a_{01} + 2a_1 + a_{12}, \quad (3-70)$$

или по формуле $d_{12} \approx ad$ (§ 3-5).

При расчете d_{12} по (3-70) радиальные размеры осевых каналов a_{01} между стержнем и обмоткой НН и a_{12} между обмотками НН и ВН определяются из условий электрической прочности главной изоляции трансформатора по испытательным напряжениям обмоток НН и ВН соответственно по табл. 4-4 и 4-5.

Радиальный размер обмотки НН a_1 может быть приближенно подсчитан по формуле

$$a_1 \approx k_1 \frac{a_1 + a_2}{3}. \quad (3-71)$$

где $(a_1 + a_2)/3$ определяется приближенно по (3-28); коэффициент k_1 может быть принят равным 1,1 для трансформаторов мощностью 25—630 кВ·А с обмотками из провода и 1,3 — с обмотками из алюминиевой фольги; 1,4 для трансформаторов мощностью 1000—6300 кВ·А

при напряжении обмотки ВН 10 кВ и мощностью 1000—80 000 кВ·А при напряжении ВН 35 кВ; 1,05—1,1 для трансформаторов на напряжение ВН 110 кВ.

Третий основной размер трансформатора (высота обмотки, см) определяется по формуле

$$l = \pi d_{12} / \beta. \quad (3-72)$$

В формулу (3-72) подставляется $\beta_{\text{н}}$, определенная для нормализованного диаметра по (3-68) или (3-69).

После расчета основных размеров трансформатора подсчитывается активное сечение стержня, т. е. чистое сечение стали, см²:

$$P_c = k_3 P_{\phi.c} = k_3 k_{\text{сп}} \frac{\pi d^2}{4}. \quad (3-73)$$

Электродвижущая сила одного витка, В,

$$u_B = 4,44 f B_c P_c \cdot 10^{-4}. \quad (3-74)$$

Определение размеров стержня и обмоток, проводимое в начале расчета, является предварительным. Задача предварительного расчета заключается в приближенном определении основных размеров магнитной системы и обмоток (d , d_{12} , l) и в расчете активного сечения стержня (P_c) и э. д. с. одного витка обмотки (u_B), что необходимо в дальнейшем для полного расчета обмоток. Сечение стержня P_c в предварительном расчете определяется по коэффициенту заполнения k_c без расчета размеров пакетов и при окончательном расчете магнитной системы может быть скорректировано на 0,5—1,0%. Полное сечение стержня $P_{\phi.c}$ может быть также найдено по табл. 8-2, а размеры пакетов стержня и ярма по табл. 8-1.

В окончательном расчете магнитной системы, проводимом после полного расчета обмоток, проверки и подгонки к заданной норме параметров короткого замыкания, определяют размеры ступеней в сечении стержня и ярма и все остальные размеры магнитной системы, уточняют активные сечения стержня и ярма, а также индукцию, подсчитывают массу стали, потери и ток холостого хода.

В процессе полного расчета обмоток и окончательного расчета магнитной системы размеры и параметры, приближенно найденные в предварительном расчете,

могут быть несколько изменены. Поэтому при расчете параметров короткого замыкания и холостого хода и других подсчетах, которые проводятся в конце расчета, после окончательной раскладки обмоток и определения реальных размеров магнитной системы следует пользоваться не предварительно полученными здесь значениями d , d_{12} , l , $(a_1 + a_2)/3$, a_1 , P_c и B_c , а размерами и параметрами, найденными для реальных обмоток и магнитной системы.

Глава четвертая

ИЗОЛЯЦИЯ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

4-1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗОЛЯЦИИ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

Каждый силовой трансформатор при оценке его электрической прочности может быть представлен состоящим из трех систем — системы частей, находящихся во включенном трансформаторе под напряжением; системы заземленных частей и системы изоляции, разделяющей как первые две системы, так и отдельные части, находящиеся под напряжением.

К системе частей, находящихся под напряжением, относятся все металлические части и детали, служащие для проведения рабочего тока (обмотки, контакты переключателей ступеней напряжения, отводы, проходные шины и шпильки вводов и др.), а также все гальванически соединенные с ними детали (защитные экраны, емкостные кольца, металлические колпаки проходных изоляторов и т. д.).

К системе заземленных частей следует отнести: магнитную систему со всеми металлическими деталями, служащими для ее крепления, бак и систему охлаждения также со всеми деталями и металлической арматурой в масляных трансформаторах или защитный кожух в сухих трансформаторах.

Изоляция, разделяющая части, находящиеся под напряжением, между собой и отделяющая их от заземленных частей, в силовых трансформаторах выполняется в виде конструкций и деталей из твердых диэлектриков — электроизоляционного картона, кабельной бумаги, лакотканей, дерева, текстолита, бумажно-бакелитовых изделий, фарфора и других материалов. Части изоляции

онных промежутков, не заполненные твердым диэлектриком, заполняются жидким или газообразным диэлектриком — трансформаторным маслом в масляных трансформаторах, атмосферным воздухом в сухих трансформаторах. В качестве такого диэлектрика иногда применяются и другие жидкости и газы, а также практикуется заливка всего трансформатора компаундом или заполнение кварцевым песком.

Изоляция обмоток может быть подразделена на главную изоляцию, т. е. изоляцию каждой из обмоток от заземленных частей и от других обмоток, и продольную изоляцию — между различными точками данной обмотки, т. е. между витками, слоями, катушками и элементами емкостной защиты. Аналогично можно подразделить также и изоляцию отводов и переключателей. Разделение изоляции на главную и продольную может быть отнесено к масляным и сухим трансформаторам.

Под классом напряжения обмотки понимают ее длительно допустимое рабочее напряжение. Класс напряжения обмотки трансформатора совпадает с номинальным напряжением электрической сети, в которую обмотка включается. Классом напряжения трансформатора считают класс напряжения обмотки ВН. Каждому классу напряжения трансформатора соответствуют: номинальное рабочее напряжение, длительно допустимое максимальное рабочее напряжение и определенные испытательные переменные напряжения при 50 Гц и импульсное. Так, для класса напряжения 35 кВ номинальными напряжениями являются 31,5, 35,0 и 38,5 кВ; наибольшее рабочее напряжение равно 40,5 кВ; испытательное переменное напряжение 50 Гц равно 85 кВ, а импульсное для полной волны 200 кВ.

4-2. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРА

Изоляция трансформатора должна выдерживать без повреждений электрические, тепловые, механические и физико-химические воздействия, которым она подвергается при эксплуатации трансформатора.

Стоимость изоляции составляет существенную долю стоимости трансформатора. Для трансформаторов высокого напряжения 220—500 кВ стоимость изоляции, включая масло, достигает 15—20% стоимости всего

трансформатора. Неправильный выбор изоляционных промежутков, материалов и размеров изоляционных конструкций может привести к разрушению трансформатора, если эти промежутки малы, или к чрезмерному расходу изоляционных и других материалов и увеличению стоимости трансформатора, если промежутки велики.

Выбор изоляционных промежутков в известной мере определяет не только расход активных, изоляционных и конструктивных материалов, но также массу, габариты, а следовательно, и предельную мощность трансформатора, который можно изготовить на заводе и доставить по железной дороге к месту установки. Уменьшение изоляционных промежутков, обеспечивающее экономию материалов и увеличение предельной мощности выпускаемых заводами трансформаторов, при достаточной электрической прочности изоляции достигается различными мерами. К этим мерам относятся прежде всего: применение рациональных конструкций обмоток и их изоляции; улучшение защиты трансформаторов в сетях от атмосферных и коммутационных перенапряжений путем установки разрядников с лучшими разрядными характеристиками; улучшение качества изоляционных материалов, а также улучшение технологии обработки изоляции и повышение общей культуры производства.

В эксплуатации силовой трансформатор постоянно находится во включенном состоянии, а его изоляция — под длительным воздействием номинального рабочего напряжения, которое она должна выдерживать без каких-либо повреждений неограниченно долгое время. Согласно требованию ГОСТ 11677-75 силовые трансформаторы должны быть также рассчитаны на работу в определенных условиях при напряжении, превышающем номинальное до 15 и 30%. В электрической системе, в которой работает трансформатор, вследствие нормальных коммутационных процессов (включение и выключение больших мощностей и т. д.) или процессов аварийного характера (короткие замыкания, обрыв линий и т. д.) возникают кратковременные перенапряжения, достигающие в отдельных редких случаях значений, близких к четырехкратному фазному напряжению. Длительность этих перенапряжений измеряется сотыми долями секунды и, как правило, не превышает 0,1 с. Нормальное рабочее напряжение и перенапряжение коммутационно-

го характера воздействуют в основном на главную изоляцию обмотки.

В воздушной сети могут возникать также импульсные волны перенапряжений, вызванных грозовыми атмосферными разрядами. Эти импульсы, достигая трансформатора, воздействуют на его изоляцию. Атмосферные перенапряжения в отдельных неблагоприятных случаях достигают величины 10-кратного фазного напряжения при длительности, измеряемой микросекундами. Воздействие атмосферных грозовых перенапряжений сказывается главным образом на продольной изоляции обмоток трансформатора, в частности на изоляции между витками, между слоями витков и между отдельными катушками обмотки.

При возникновении перенапряжений того или иного типа в случае недостаточной электрической прочности изоляции может произойти пробой, т. е. местное разрушение изоляции.

Для упрощения расчета и стандартизации требований, предъявляемых к электрической прочности изоляции готового трансформатора, электрический расчет изоляции производится так, чтобы она могла выдержать контрольные и типовые испытания, предусмотренные соответствующими нормами. Нормы испытаний составлены с учетом возможных в практике значений, длительности и характера электрических воздействий, содержат необходимые запасы прочности и закреплены в виде ГОСТ. Нормы периодически пересматриваются в соответствии с уточнением технических требований, предъявляемых к трансформаторам, развитием их производства и улучшением условий эксплуатации. Эти нормы являются строго обязательными для всех предприятий, выпускающих трансформаторы.

Для проверки электрической прочности изоляции масляных трансформаторов обычной конструкции, т. е. не имеющих ступенчатой изоляции по отношению к земле установлены следующие контрольные испытания каждого выпускаемого из производства трансформатора (ГОСТ 1516-73).

1. Испытанию подвергается изоляция каждой из обмоток, электрически не связанной с другими обмотками. Испытательное напряжение (50 Гц) от постороннего источника прикладывается между испытываемой обмоткой, замкнутой накоротко, и заземленным баком, с которым соединяется магнитная система и замкнутые накоротко все прочие обмотки испытываемого трансформатора. Длительность приложения испытательного напряжения 1 мин. Значения испытательных напряжений при нормальных атмосферных условиях

Таблица 4-1

**Испытательные напряжения промышленной частоты (50 Гц)
для масляных силовых трансформаторов (ГОСТ 1516-73)**

Класс напряжения, кВ	3	6	10	15	20	35	110	150	220	330	500
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	3,6	7,2	12,0	17,5	24	40,5	126	172	252	363	525
Испытательное напряжение $U_{исп}$, кВ	18	25	35	45	55	85	200	230	325	460	680

Примечание. Обмотки масляных и сухих трансформаторов с рабочим напряжением до 1 кВ имеют $U_{исп}=5$ кВ.

Таблица 4-2

**Испытательные напряжения промышленной частоты (50 Гц)
для сухих силовых трансформаторов (ГОСТ 1516-73)**

Класс напряжения, кВ	До 1,0	3	6	10	15
Испытательное напряжение, кВ	3	10	16	24	37

[температура $+20^{\circ}\text{C}$, барометрическое давление 0,1 МПа (760 мм рт. ст.), влажность 11 г/м^3] должны быть равны значениям, указанным в табл. 4-1 (для сухих трансформаторов табл. 4-2).

При этом испытании все части обмотки имеют один и тот же потенциал и проверяется главная изоляция испытываемой обмотки, ее отводов, вводов и переключателей.

2. После испытания напряжением, приложенным от другого источника, изоляция обмоток испытывается напряжением, наведенным в самом испытываемом трансформаторе в результате приложения к одной из обмоток (между ее вводами) двойного номинального напряжения повышенной частоты. Длительность приложения этого испытательного напряжения для силовых трансформаторов 1 мин.

При этом испытании в каждом витке, в каждой катушке и обмотке наводится двойная э.д.с. и проверяется продольная изоляция всех обмоток, отводов и переключателей.

Контрольные испытания наведенным напряжением не гарантируют в полной мере прочность изоляции между катушками, витками и слоями. Для испытания этой изоляции трансформатор каждого нового типа подвергается типовому испытанию импульсным напряжением по табл. 4-3.

Электрическая и механическая прочность и нагревостойкость изоляции трансформатора обеспечиваются: правильным учетом тех воздействий, которые испыты-

**Импульсные испытательные напряжения внутренней изоляции
(в масле) силовых трансформаторов (ГОСТ 1516-73)**

Класс напряжения обмотки, кВ	Амплитуды импульсных напряжений, кВ		Класс напряжения обмотки, кВ	Амплитуды импульсных испыта- тельных напряже- ний, кВ	
	Полная волна	Срезанная волна		Полная волна	Срезанная волна
3	44	50	110	480	550
6	60	70	150	550	600
10	80	90	220	750	835
15	108	120	330	1050	1150
20	130	150	500	1550	1650
35	200	225			

ваит изоляция в эксплуатации; правильным выбором методов и величин, воздействующих на изоляцию при приемо-сдаточных и типовых испытаниях трансформатора, и правильным выбором изоляционных конструкций их размеров, материала и технологии изготовления и обработки.

Обмотки и все токоведущие части трансформатора при его работе нагреваются от возникающих в них потерь. Как длительное, так и кратковременное (аварийное) воздействие высоких температур на изоляцию обмоток вызывает старение изоляции, которая постепенно теряет свою эластичность, становится хрупкой, снижает электрическую прочность и разрушается. В правильно рассчитанном и правильно эксплуатируемом трансформаторе изоляция обмоток может служить 20—25 лет и более.

Необходимая нагревостойкость изоляции, гарантирующая длительную безаварийную работу трансформатора, достигается ограничением допустимой температуры его обмоток и масла, применением изоляционных материалов соответствующего класса, выдерживающих длительное воздействие допустимой температуры, и рациональной конструкцией обмоток и изоляционных деталей, обеспечивающей их нормальное охлаждение.

При прохождении электрического тока по обмоткам и другим токоведущим частям между ними возникают

механические силы. В аварийном случае короткого замыкания трансформатора механические силы, достигая значительных величин, тем больших, чем больше мощность трансформатора, могут вызвать разрушающие напряжения в междукатушечной или опорной изоляции обмоток.

В обычно применяемых конструкциях трансформаторов изоляция подвергается воздействию, как правило, только сжимающих усилий, а наиболее употребительные изоляционные материалы, например электроизоляционный картон, кабельная бумага, бумажно-бакелитовые изделия, текстолит, допускают сжимающие напряжения до 20—40 МПа, что практически оказывается совершенно достаточным.

Изоляция трансформатора не должна вступать в химическое воздействие со средой, охлаждающей обмотки, с трансформаторным маслом или другим заполнителем. Материалы, применяемые в масляных трансформаторах, например электроизоляционный картон, бумага разных сортов, фарфор, хлопчатобумажная лента, не вступают в химическое взаимодействие с маслом, не разрушаются сами и не способствуют химическому разложению и загрязнению масла.

Изоляционные материалы, содержащие в том или ином виде смолы, лаки и эмали, например эмалевая изоляция провода, бумажно-бакелитовые изделия, лакоткани, текстолит, должны содержать смолы, лак и эмали, нерастворимые в трансформаторном масле.

Решающее значение в обеспечении электрической прочности изоляции имеет технология ее обработки. Одной из важнейших технологических операций обработки изоляции является вакуумная сушка трансформатора перед заливкой его маслом после окончания сборки. Эта операция проводится для удаления влаги и газов из изоляции трансформатора с целью увеличения ее электрической прочности и уменьшения диэлектрических потерь, стабилизации размеров изоляционных деталей и увеличения динамической прочности трансформатора при коротком замыкании, повышении надежности и увеличении срока службы трансформатора.

Основная работа в совершенствовании процесса сушки ведется в направлении некоторого уменьшения температуры сушки и существенного снижения остаточного давления в сушильных камерах. Считается, что ос-

таточное давление в камере во время сушки трансформатора не должно быть выше 650 Па (5 мм рт. ст.) при классе напряжения 10 кВ; 130 Па (1 мм рт. ст.) при 35—150 кВ; 13 Па (0,1 мм рт. ст.) при 220—500 кВ и 1 Па (0,01 мм рт. ст.) при 750—1150 кВ. Немаловажное значение для электрической прочности трансформатора имеет заливка его после сушки хорошо просушенным и дегазированным маслом.

Трансформаторное масло, соприкасаясь в горячем состоянии с воздухом, в большей степени подвергается химическим воздействиям и увлажнению, чем твердая изоляция трансформатора. Поэтому в эксплуатации трансформаторов практикуются систематическая очистка, сушка и смена масла, а также принимаются меры, направленные на уменьшение поверхности соприкосновения масла с воздухом, осуществляется осушение поступающего в расширитель воздуха в специальных химических осушителях, производятся герметизация расширителей, защита открытой поверхности масла слоем инертного газа или синтетическими пленками и т. д.

Изоляция сухих трансформаторов должна предохраняться от увлажнения, а при установке трансформаторов в помещениях, воздух которых содержит пары кислот или других разъедающих жидкостей, — от воздействия этих паров. Этим целям служит пропитка обмоток различными лаками. Изоляция трансформатора должна быть не только прочной во всех отношениях, но также и дешевой. При условии соблюдения равной прочности всегда следует добиваться получения более простой в производстве конструкции, применения более дешевых материалов, экономного их расходования, а также применения материалов, допускающих более простую и дешевую технологическую обработку.

4-3. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ТРАНСФОРМАТОРОСТРОЕНИИ

В соответствии с воздействиями, которые испытывает изоляция трансформатора в эксплуатации, и требованиями к электрической и механической прочности изоляции, ее нагревостойкости и химической стойкости в трансформаторостроении нашло применение сравнительно небольшое число различных изоляционных материалов. Эти материалы, хорошо отвечая всем требованиям, одновременно являются дешевыми, а также требуют сравнительно несложной технологической обработки. Ниже приводятся краткие характеристики этих материалов и область их применения в трансформаторострое-

нии. В масляных трансформаторах для внутренней изоляции применяются главным образом изоляционные материалы класса нагревостойкости А.

1. Кабельная бумага ГОСТ 645-67. Кабельная обыкновенная бумага марок К-080, К-120 и К-170 с толщиной 0,08; 0,12 и 0,17 мм изготавливается из небеленой сульфатной целлюлозы и выпускается в рулонах шириной 500, 600 и 750 мм (± 3 мм). В трансформаторах применяется бумага главным образом марки К-120 толщиной 0,12 мм для изоляции обмоточного провода (на кабельном заводе); в виде полос разной ширины для междуслойной изоляции в многослойных цилиндрических обмотках классов напряжения от 6 и 10 до 500 кВ; в виде полосок шириной 2—3 см, наматываемых вручную или на специальных станках слоем толщиной от 0,1 до 3—5 см, для изоляции отводов, элементов емкостной защиты (емкостных колец, экранирующих витков, цилиндрических экранов) и усиления изоляции входных катушек обмоток. В трансформаторах кабельная бумага является одним из основных изоляционных материалов.

2. Телефонная бумага ГОСТ 3553-73. Изготавливается из сульфатной небеленой целлюлозы, выпускается в виде рулонов при ширине полотна 500 и 750 мм (± 3 мм) и толщине 0,05 мм. В трансформаторах применяется бумага марки КТ-50 (кабельная телефонная) главным образом в качестве междуслойной изоляции и изоляции отводов и ответвлений некоторых обмоток, наматываемых из провода круглого сечения.

3. Лакоткань электроизоляционная ГОСТ 2214-70. Вырабатывается из хлопчатобумажной ткани, прошедшей трехкратную пропитку масляным лаком. Выпускается в рулонах шириной от 830 до 880 мм. Класс нагревостойкости А (105°C). В масляных трансформаторах применяется главным образом лакоткань марки ЛХММ (лакоткань хлопчатобумажная на основе масляного лака, маслостойкая), с толщиной 0,17; 0,20 и 0,24 мм (допуск $\pm 0,02$ мм). В виде лент шириной 2—3 см, наматываемых вручную, лакоткань находит применение для изоляции отводов, главным образом в местах, где требуются эластичность и механическая прочность, например на местах пайки, изгиба и т. д.

В других местах изоляции отводов лакоткань вытеснена менее эластичной, но столь же электрически прочной и значительно более дешевой кабельной бумагой.

Стеклолакоткань электроизоляционная ГОСТ 10156-70. В сухих трансформаторах, работающих при повышенной температуре и требующих изоляции повышенного класса нагревостойкости, может применяться электроизоляционная стеклолакоткань, изготавливаемая из стеклоткани на основе кремнийорганического лака марки ЛСК-155/180 классов нагревостойкости Г и Н и на основе битумно-масляного алкидного лака марки ЛСБ-120/130 классов нагревостойкости Е и В. Ширина рулона стеклоткани 690; 790; 890 и 990 мм (± 20 мм); толщина марки ЛСБ 0,12; 0,15; 0,17 и 0,20 мм; марки ЛСК — те же толщины и 0,05; 0,06; 0,08 и 0,10 мм.

4. Бумага крепированная электроизоляционная ГОСТ 13078-67. Изготавливается из небеленой сульфатной целлюлозы; толщина основы (разглаженной бумаги) $0,17 \pm 0,03$ мм, толщина крепированной бумаги $0,5 \pm 0,1$ мм; удлинение $60 \pm 0,1\%$, масса 1 м^2 120 г. Выпускается в рулонах шириной 1000 мм.

В трансформаторах успешно применяется вместо лакоткани в виде ленты шириной 2—4 см для изоляции отводов.

5. Хлопчатобумажные ленты ГОСТ 5414-63. Киперная лента толщиной 0,45 мм и шириной от 1 до 6 см и тафтяная толщиной 0,25 мм и шириной от 1 до 5 см. В трансформаторах применяются только для механического крепления витков обмотки, крепления изоляции отводов и т. д. При электрическом расчете изоляции во внимание не принимаются.

6. Картон электроизоляционный для аппаратов с масляным заполнением ГОСТ 4194-68. Изготавливается из сульфатной целлюлозы без красителей, наполнителей и склеивающих веществ. Выпускается следующих марок: А — картон эластичный, гибкий с высокой стойкостью к действию поверхностных разрядов в масле — применяется для изготовления деталей главной изоляции трансформаторов классов напряжения до 750 кВ включительно; Б — картон средней плотности с повышенными электрическими характеристиками — применяется для изготовления главной изоляции трансформаторов классов напряжения до 220 кВ включительно; В — картон твердый с малой сжимаемостью под давлением и высокой электрической прочностью перпендикулярно к поверхности — применяется для изготовления продольной изоляции трансформаторов; Г — картон средней плотности с повышенным сопротивлением расслаиванию — служит основой для получения склеенного картона и изготовления деталей. Толщина листов: марки А 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0 и 6,0 мм, марки Б те же толщины и 1,0; 1,5 мм, марки В 2,0; 2,5 и 3,0 мм, марки Г 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0 мм. Размеры листов: марок А, Б, В 3000×4000; 3000×2000; 1500×1000 и 1000×1000 мм; марки Г при толщине 1,0 мм 850×1100; 850×1000 и 850×950, при толщине более 1,0 мм те же размеры и 1850×3850; 1650×3800 мм. Картон с толщиной 0,5 мм выпускается в рулонах шириной 980 мм и более. Плотность для картона толщиной 1,0 и 1,5 мм марки Б 950—1100 кг/м³; марки Г 900—1150 кг/м³. При толщине от 1,5 мм и более плотность марки А 900—1000 кг/м³; марки Б 1000—1150 кг/м³; марки В 1150—1250 кг/м³ и марки Г 1000—1200 кг/м³. Усадка после сушки в свободном состоянии для картона толщиной 1,0 мм и более марок А, Б, В 5,0%, марки Г 6,0%. Электрокартон применяется как материал для намотки цилиндров между обмотками, изготовления перегородок, щитов, шайб, ярмовой изоляции (главная изоляция); междукатушечных прокладок, реек (продольная изоляция).

В сухих трансформаторах рекомендуется применять картон марки ЭВ (ГОСТ 2824-60) с толщиной 1,0; 1,25; 1,50; 1,75; 2,0; 2,5 и 3,0 мм, выпускаемый в листах с размерами по соглашению заказчика с поставщиком. Плотность картона при толщине 1,0—1,5 мм 1000 кг/м³, при толщине 1,75—3,0 мм 950 кг/м³.

7. Бумажио-бакелитовые изделия ГОСТ 8726-72. Изготавливаются в виде трубок или цилиндров путем намотки лакированной бакелитовым лаком бумаги с последующим запеканием и лакировкой. Обладают высокой электрической и механической прочностью. В трансформаторах применяются в виде цилиндров различных диаметров и высоты для изоляции между обмотками и между обмоткой и стержнем магнитной системы, а также в виде трубок с толщиной стенки 2, 4, 6, 8 мм и более и длиной до 500 мм для изоляции отводов (марка ТБ) или трубок с нормированной электрической прочностью вдоль слоев (марка ТБ11) для переключающих устройств. Плотность приближенно равна 1050 кг/м³. Цилиндры марки ЦБ имеют нормированные внутренние диаметры. Диаметры от 85

до 800 мм должны быть числами, кратными 5; от 810 до 1200 мм — кратными 10. Пределы длины цилиндров — от 200 до 2000 мм. Внутренние диаметры трубок от 10 до 80 мм — числа, кратные 2 или 5.

8. Гетинакс ГОСТ 2718-74. Изготавливается из пропитанной бакелитовым лаком бумаги, спрессованной при повышенной температуре. Выпускается в виде досок различной толщины, обладает высокой электрической и механической прочностью. Плотность 1280—1400 кг/м³. В масляных трансформаторах применяется марка V-1 с толщиной листов от 5 до 50 мм главным образом для досок зажимов, дисков переключателей и крепления на крышке трансформатора проходных многоамперных шин.

9. Дерево. В масляных и сухих трансформаторах применяется белый бук — для реек, прокладываемых между обмотками и изоляционными цилиндрами или между слоями обмоток при напряжениях не выше 10 кВ, а также для планок, забиваемых между стержнем магнитной системы и обмоткой НН; красный бук — для конструкций крепления отводов.

10. Фарфор. Применяется в масляных трансформаторах в виде проходных изоляторов (вводов). Может применяться также в качестве деталей крепления отводов трансформаторов с напряжением 110 кВ и более и в качестве деталей опорной изоляции обмоток и изоляции отводов сухих трансформаторов.

11. Масло трансформаторное ГОСТ 982-68. Применяется в качестве жидкого диэлектрика для заливки масляных трансформаторов. Будучи прекрасным изолятором, обеспечивает интенсивное отведение тепла от обмоток и магнитной системы трансформатора путем конвекции. Требуется постоянного ухода — очистки, фильтрации, сушки, смены.

12. Синтетические жидкие диэлектрики (совтол и др.). Негорючие жидкости, имеют преимущество перед трансформаторным маслом, обеспечивая пожарную безопасность трансформаторных установок. Их недостатками являются высокая цена при высокой плотности (до 1450—1500 кг/м³) и токсичность их паров и особенно продуктов разложения, получающихся при возникновении электрической дуги.

13. Материалы с повышенной нагревостойкостью. Применяются в сухих трансформаторах с целью повышения допустимой температуры обмоток и других частей и уменьшения массы и размеров трансформатора. К этим материалам относятся дельта-асбестовая (марка провода ПДА) и стекловолокнистая (марка провода ПСД) изоляция обмоточного провода класса нагревостойкости В; стеклолакоткани на кремнийорганических и других лаках классов Н и В; стеклотекстолит класса В (марка СТ) и др.

4-4. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В электрическом отношении изоляция трансформатора должна надежно предохранять части, находящиеся под напряжением — обмотки, отводы, переключатели и вводы — от пробоя между собой и на заземленные части как при рабочем напряжении, так и при возможных перенапряжениях. Расчет изоляции для каждой части, находящейся под напряжением, обычно заключается: 1) в выявлении основных изоляционных промежутков между этой частью и другими такими частями и заземленными деталями; 2) в определении по нормам испытательных напряжений для этих промежутков;

3) в выборе размеров этих промежутков и подборе изоляционных конструкций и материалов, обеспечивающих электрическую прочность при найденных испытательных напряжениях.

Расположение основных изоляционных промежутков определяется конструкцией трансформатора, взаимным расположением его обмоток, магнитной системы, бака и других частей. Так, в стержневом трансформаторе современной конструкции с concentрическими

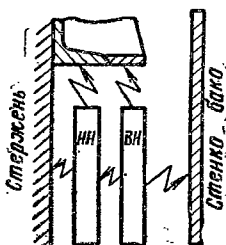


Рис. 4-1. Основные изоляционные промежутки главной изоляции в concentрических обмотках.

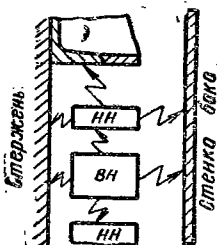


Рис. 4-2. Основные изоляционные промежутки главной изоляции в чередующихся обмотках.

обмотками основными промежутками главной изоляции являются: осевые каналы между обмоткой НН и стержнем, между обмотками ВН и НН; пространство между торцами обмоток НН и ВН и ярмом; пространство между обмоткой ВН и стенкой бака и др. (рис. 4-1). Этим промежуткам соответствуют вполне определенные электрические воздействия при испытаниях трансформатора испытательным напряжением. В трансформаторе с чередующимися обмотками в связи с другим расположением обмоток изменится как расположение основных изоляционных промежутков, так и воздействие на них испытательных напряжений (рис. 4-2).

При расчете главной изоляции очень важно выявить все изоляционные промежутки, подверженные опасности пробоя, и правильно определить те испытательные напряжения, под воздействием которых эти промежутки будут находиться.

Определение минимально допустимых размеров изоляционных промежутков тесно связано с теми изоляционными конструкциями, которыми будут заполняться эти промежутки. Каждая изоляционная конструкция, как бы сложна она ни была, всегда может быть представлена в виде комбинации из нескольких простых элементов (рис. 4-3):

- 1) сплошной изоляции из твердого изолирующего материала;
- 2) чисто масляного или воздушного промежутка;
- 3) барьера, т. е. перегородки из твердого изолирующего материала в масляном или воздушном промежутке;
- 4) покрытия одного или обоих электродов тонким слоем твердого изолирующего материала, плотно облегающего электрод и принимающего его форму;

5) изолирования, аналогичного покрытию, но отличающегося большей толщиной твердого диэлектрика, обеспечивающей снижение напряженности в масляной части промежутка.

Примеры простейших изоляционных конструкций применительно к масляному трансформатору показаны на рис. 4-4. В главной изоляции масляных и сухих трансформаторов обычно применяются конструкции, состоящие из комбинации нескольких элементов. Раз-

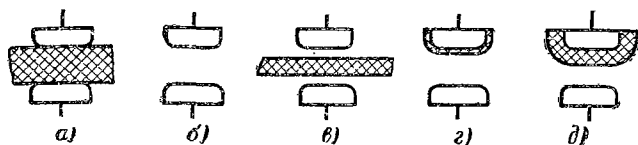


Рис. 4-3. Элементы изоляционных конструкций.

a — сплошная изоляция из твердого диэлектрика; *б* — чисто масляный (воздушный) промежуток; *в* — барьер; *г* — покрытие одного из электродов; *д* — изолирование одного из электродов.

меры изоляционных промежутков и сложность конструкций обычно возрастают с ростом класса напряжения и испытательных напряжений трансформаторов.

В практике отечественного и зарубежного трансформаторостроения наибольшее распространение получила маслбарьерная главная изоляция обмоток, состоящая из различных комбинаций масляных каналов или промежутков с барьерами в виде цилиндров и

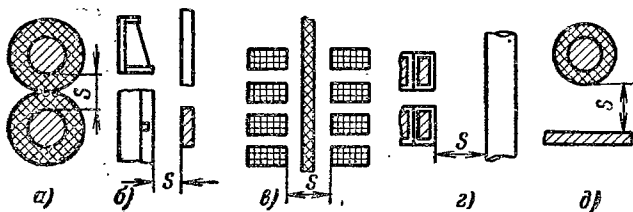


Рис. 4-4. Простейшие изоляционные конструкции.

a — твердая изоляция между двумя отводами; *б* — масляный промежуток между шиной отвода и яровой балкой; *в* — барьер — междуфазная перегородка между обмотками ВН; *г* — покрытие — изоляция витка в промежутке между обмоткой ВН и стяжной шпилькой остова; *д* — изолированный отвод вблизи стенки бака.

простых и угловых шайб бумажно-бакелитовых, из электроизоляционного картона и кабельной бумаги.

Размеры изоляционных промежутков главной изоляции обмоток существенно возрастают с ростом класса напряжения трансформатора, что приводит к увеличению расхода изоляционных материалов, а также к увеличению массы и габаритов магнитной системы, обмоток и всего трансформатора. Относительное изменение размеров обмоток и масляного бака, а также усложнение схем изоляционных

маслобарьерных конструкций по мере роста класса напряжения трансформатора от 35 до 500 кВ показано на рис. 4-5 для трансформаторов условно одинаковой мощности с одинаковыми диаметрами стержня и сечениями обмоток.

Многообразие внешних форм токоведущих и заземленных частей и их взаимного расположения, возможность комбинации в од-

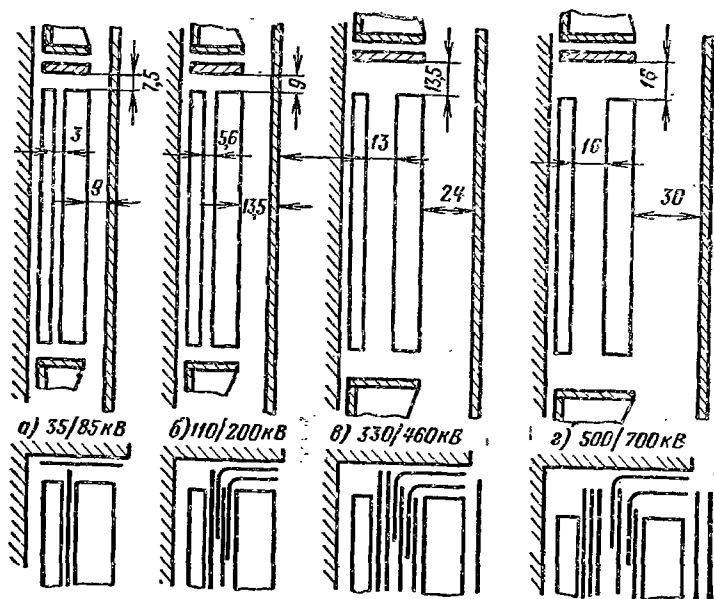


Рис. 4-5. Изменение изоляционных расстояний и усложнение структуры главной изоляции обмоток с ростом класса напряжения от 35 до 500 кВ (испытательное напряжение от 85 до 680 кВ). Размеры в сантиметрах.

ном промежутке различных изоляционных деталей и различных материалов, а также то обстоятельство, что напряжение частоты 50 Гц и импульсные перенапряжения оказывают на изоляцию совершенно различные воздействия, затрудняют создание обобщенного метода расчета всевозможных изоляционных промежутков трансформатора и заставляют до применения в трансформаторах подвергать тщательному экспериментальному исследованию каждую новую изоляционную конструкцию, каждую новую комбинацию заполнения изоляционного промежутка. Некоторые общие рекомендации могут быть даны для ограниченного числа простейших случаев. В большинстве конкретных случаев приходится пользоваться опытом применения определенных, проверенных на практике конструкций.

4-5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ РАССТОЯНИЙ ДЛЯ НЕКОТОРЫХ ЧАСТНЫХ СЛУЧАЕВ (МАСЛЯНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ)

Практические рекомендации этого и следующего параграфов по выбору изоляционных конструкций и минимально допустимых изоляционных расстояний даются для некоторых простейших общих и ряда частных случаев и охватывают элементы главной и продольной изоляции, необходимые для расчета масляного и сухого силовых трансформаторов. В этих рекомендациях учтен необходимый запас прочности изоляции, представляющий собой отношение пробивного напряжения к испытательному и являющийся показателем большого или меньшего доверия к прочности и стабильности той или иной конструкции.

Для расчета изоляционных расстояний во всех таблицах даны значения для твердой изоляции из электротехнического картона или кабельной бумаги. При определении реальных допустимых расстояний необходимо учитывать, помимо минимального промежутка, требуемого условиями электрической прочности изоляции, возможные допуски в отклонении действительных размеров токоведущих и заземленных частей от проектных. Эта поправка в явном или скрытом виде введена во все таблицы § 4-5 и 4-6. В этих параграфах содержатся практические рекомендации, пользоваться которыми следует после ознакомления с конструкциями обмоток, приведенными в гл. 5.

Некоторые изоляционные расстояния, в частности вертикальные и горизонтальные масляные и воздушные каналы в обмотках, после выбора их по условиям электрической прочности изоляции должны быть проверены и по условиям охлаждения. Размеры этих каналов — соотношение ширины и длины канала — должны быть выбраны такими, чтобы они обеспечивали свободный доступ охлаждающего масла или воздуха ко всем частям (виткам или катушкам) обмотки (§ 9-5).

Минимально допустимые изоляционные расстояния в главной и продольной изоляции обмоток и отводов масляных трансформаторов обычно выбираются применительно к определенным конструкциям изоляции, для которых они проверены опытным путем. При распространении этих расстояний на какие-либо другие кон-

струкции необходима новая опытная проверка. Так, изоляционные расстояния главной изоляции обмоток, указанные в табл. 4-4 и 4-5, можно принимать только при конструкции, изображенной на рис. 4-6, и применении изоляционных материалов, указанных в пояснениях к этому рисунку.

В соответствии с принятой выше классификацией изоляции трансформатора в дальнейшем будут рассмот-

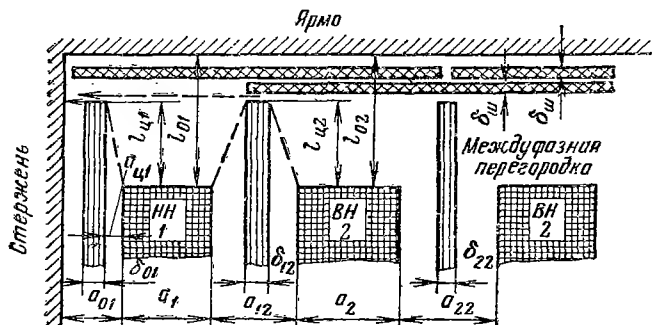


Рис. 4-6. Главная изоляция обмотки ВН для испытательных напряжений от 5 до 85 кВ. Штриховыми линиями показаны возможные пути разряда, определяющие размеры $l_{ц}$.

рены изоляционные конструкции и допустимые расстояния для:

- 1) главной изоляции обмоток (изоляции от заземленных частей и других обмоток);
- 2) продольной изоляции обмоток (изоляции между витками, слоями и катушками);
- 3) главной и продольной изоляции отводов.

I. Главная изоляция обмоток определяется в основном электрической прочностью при 50 Гц и соответствующими испытательными напряжениями, определяемыми по табл. 4-1. На рис. 4-6 показана конструкция главной изоляции обмоток масляных трансформаторов классов напряжения от 1 до 35 кВ (испытательные напряжения от 5 до 85 кВ).

Изоляция между обмотками ВН и НН осуществляется жесткими бумажно-бакелитовыми цилиндрами или мягкими цилиндрами, намотанными при сборке трансформатора из электроизоляционного картона. Размер выступа цилиндра за высоту обмотки ($l_{ц1}$ и $l_{ц2}$) обеспе-

чивает отсутствие разряда по поверхности цилиндра между обмотками или с обмотки на стержень. Изоляция обмоток от ярма при испытательном напряжении 85 кВ усиливается шайбами и подкладками из электроизоляционного картона. Между обмотками ВН соседних стержней устанавливается междофазная перегородка из электроизоляционного картона.

Минимально допустимые изоляционные расстояния от обмотки до стержня и ярма, между обмотками, а также главные размеры изоляционных деталей с учетом конструктивных требований и производственных допусков в зависимости от мощности трансформатора для испытательных напряжений 5—85 кВ приведены в табл. 4-4 и 4-5. Данными табл. 4-5 можно пользоваться также при определении изоляционных расстояний между обмотками СН и НН в трехобмоточном трансформаторе.

В трансформаторах класса напряжения 110 кВ главная изоляция имеет два варианта. В двухобмоточных трансформаторах, регулируемых под нагрузкой (РПН), при нерасщепленных обмотках НН и в некоторых трехобмоточных трансформаторах линейный конец подводится к верхней части обмотки, а нижний конец обмотки

Таблица 4-4

Главная изоляция. Минимальные изоляционные расстояния обмоток НН с учетом конструктивных требований

Мощность трансформатора S , кВ·А	$U_{\text{исп}}$ для НН, кВ	НН от ярма l_{01} , см	НН от стержня, см			
			δ_{01}	$a_{\text{ш1}}$	a_{01}	$l_{\text{ш1}}$
25—250	5	1,5	Картон 2×0,05	—	0,4	—
400—630*	5*	Принимается равным найденному по испытательному напряжению обмотки ВН	Картон 2×0,05	—	0,5	—
1000—2500	5		0,4	0,6	1,5	1,8
630—1600	18; 25 и 35		0,4	0,6	1,5	2,5
2500—6300	18; 25 и 35		0,4	0,8	1,75	2,5
630 и выше	45		0,5	1,0	2,0	3,0
630 и выше	55		0,5	1,3	2,3	4,5
Все мощност сти	85		0,6	1,9	3,0	7,0

* Для винтовой обмотки с испытательным напряжением $U_{\text{исп}}=5$ кВ размеры взять из следующей строки для мощностей 1000—2500 кВ·А.

Главная изоляция. Минимальные изоляционные расстояния обмоток ВН (СН) с учетом конструктивных требований

Мощность трансформатора S , кВ·А	$U_{\text{исп}}$ для ВН(СН), кВ	ВН от ярма, см		Между ВН (СН) и НН, см		Выступ цилиндра $l'_{\text{ц2}}$, см	Между ВН(СН) и НН, см	
		$l_{\text{о2}}$	$\delta_{\text{ш}}$	a_{12}	δ_{12}		a_{22}	δ_{22}
25—100	18; 25 и 35	2,0	—	0,9	0,25	1,0	0,8	—
160—630	18; 25 и 35	3,0	—	0,9	0,3	1,5	1,0	—
1000—6300	18; 25 и 35	5,0	—	2,0	0,4	2,0	1,8	—
630 и выше	45	5,0	0,2	2,0	0,4	2,0	1,8	0,2
630 и выше	55	5,0	0,2	2,0	0,5	3,0	2,0	0,3
160—630	85 (прим. 1)	7,5	0,2	2,7	0,5	5,0	2,0	0,3
1000—6300	85 (прим. 1)	7,5	0,2	2,7	0,5	5,0	3,0	0,3
10 000 и выше	85	8,0	0,3	3,0	0,6	5,0	3,0	0,3

Примечания: 1. Для цилиндрических обмоток минимальное изоляционное расстояние $a_{12}=2,7$ см. Электростатический экран с изоляцией 0,3 см. При расчете по формуле (3-17) и по формуле (7-32) принимать $a_{12}=3,0$ см.

2. При наличии прессующих колец (§ 7-3 и 8-1) $l'_{\text{о2}}$ принимается увеличенным против данных табл. 4-5 для трансформаторов 1000—6300 кВ·А на 4,5 см, для двухобмоточных трансформаторов 10 000—63 000 кВ·А на 6,0 см и для трехобмоточных трансформаторов этих мощностей на 10 см. Расстояние от нижнего ярма $l'_{\text{о2}}$ и в этих случаях выбирается по табл. 4-5.

3. В трехобмоточных трансформаторах при $U_{\text{исп}}=85$ кВ канал между обмотками СН и НН a_{12} увеличивается от 2,7 до 3,6—4,0 см для вывода ответвлений от середины обмотки СН (из расчета — изолированный опрессованный вывод 2,0 см, цилиндр 0,6 см, канал 1,0—1,4 см).

присоединяется к нейтрали. Изоляция обмотки ВН от верхнего ярма определяется по испытательному напряжению 200 кВ и от нижнего ярма по испытательному напряжению 100 кВ. Главная изоляция обмотки ВН может быть принята по рис. 4-7.

Входная катушка А обмотки ВН размещается между двумя соединенными с этой катушкой емкостными кольцами ЕК. Емкостные кольца имеют изоляцию из кабельной бумаги 4 мм на сторону, первые четыре катушки—дополнительную изоляцию по табл. 4-10. Основная часть обмотки ВН изолирована от обмотки НН масляным каналом и двумя цилиндрами из электроизоляционного картона. Изоляция от верхнего ярма (от прессующего кольца) обеспечивается промежутком с размером 90 мм, заполненным опорными деталями из картона, шайбой из картона и отворотом угловой шайбы. Изоляция от нижнего ярма усиливается шайбой.

Регулировочная обмотка, разделенная на две части — грубого ($PO_{\text{груб}}$) и тонкого ($PO_{\text{тонк}}$) регулирования, располагается снаружи основной части обмотки ВН

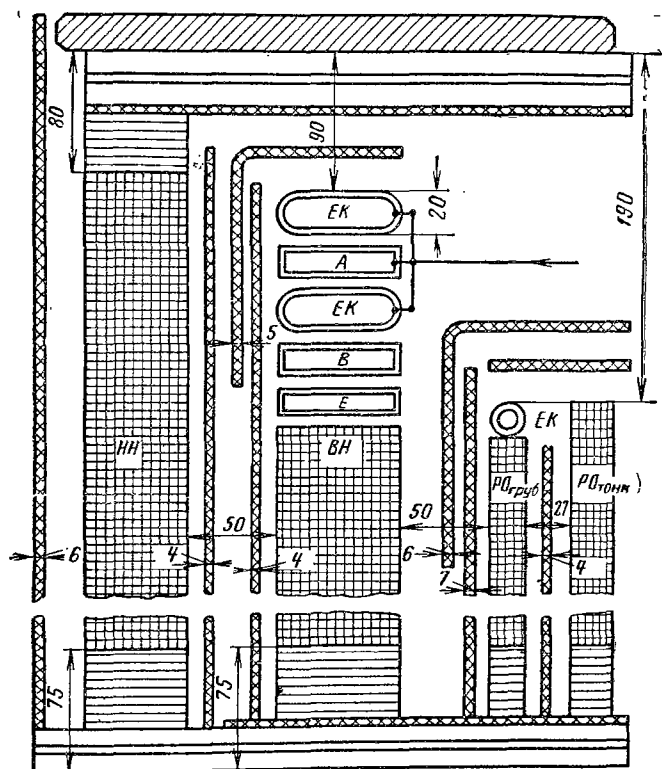


Рис. 4-7. Главная изоляция обмотки ВН класса напряжения 110 кВ с вводом в верхнем конце обмотки (испытательное напряжение линейного конца 200 кВ, нейтрали 100 кВ).

НН — обмотка НН; ВН — основная часть обмотки ВН; $PO_{\text{груб}}$ и $PO_{\text{тонк}}$ — регулировочные обмотки грубого и тонкого регулирования; ЕК — емкостное кольцо; А, В, Е — первые катушки обмотки ВН.

двумя концентриями. Изоляция основной части обмотки ВН от регулировочной аналогична изоляции между обмотками ВН и НН. Расстояние между обмотками $PO_{\text{тонк}}$ соседних фаз не менее 40 мм при наличии перегородки из электроизоляционного картона толщиной 3 мм. Защита обмотки ВН от импульсных перена-

маторах обмотка ВН разделяется на две части, соединяемые параллельно. Линейный конец подводится к середине высоты обмотки (см. рис. 2-10, з). Испытательное напряжение обмотки у линейного конца 200 кВ, у нейтрали 100 кВ. Главная изоляция обмотки может быть принята по рис. 4-8.

Изоляция основной части обмотки ВН от обмотки НН осуществляется масляным каналом и двумя цилиндрами из электроизоляционного картона. Между первыми двумя катушками каждой половины обмотки ВН устанавливается емкостное кольцо, имеющее изоляцию из кабельной бумаги 4 мм на сторону, первые четыре катушки имеют дополнительную изоляцию по табл. 4-10. Изоляция основной части обмотки от регулировочной осуществляется цилиндрами и угловыми шайбами. Изоляция обмотки ВН от верхнего (от прессующего кольца) и от нижнего ярма обеспечивается промежутками с размерами 90 и 80 мм, заполненными опорными деталями из электроизоляционного картона. Расстояние между обмотками $PO_{\text{тонк}}$ соседних фаз не менее 40 мм при наличии перегородки из картона толщиной 3 мм. Защита обмотки ВН от импульсных перенапряжений осуществляется установкой емкостных колец и дополнительной изоляцией первых катушек обмотки.

В трехобмоточном трансформаторе класса напряжения 110 кВ для вывода концов обмотки СН необходимо увеличивать расстояние от обмотки ВН до прессующего кольца на 5 см, т. е. принимать это расстояние не 9, а 14 см. Расстояние до ярма нижнего конца обмотки в этом случае остается равным 7,5 или 8,0 см.

II. Продольная изоляция обмоток. Под продольной изоляцией обмоток понимается изоляция между витками, между слоями витков и между катушками. Эта изоляция может определяться как электрической прочностью при 50 Гц, так и прочностью при импульсах. Воздействие на обмотку импульса существенно отличается от воздействия напряжения при 50 Гц, однако те и другие испытательные напряжения связаны с рабочим напряжением обмотки. В дальнейшем для отдельных конкретных случаев все рекомендации даны с учетом импульсной прочности, но исходят из рабочего напряжения обмотки или испытательного при 50 Гц.

Изоляция между витками обычно обеспечивается собственной изоляцией обмоточного провода. Дополни-

тельная изоляция между витками применяется обычно только на входных катушках обмоток фаз. Данные обмоточных проводов и их изоляции представлены в § 5-2.

Выбор изоляции провода может быть сделан по табл. 4-6. В этой таблице дана изоляция провода (витковая) для большей части катушек трансформатора с нормальной изоляцией. Рекомендации по выбору изоляции витков входных (крайних) катушек обмотки даны ниже.

Междуслойная изоляция в обмотках из круглого провода определяется главным образом из условий импульсной прочности. Рекомендации по междуслойной изоляции для входных катушек обмотки даны особо.

Таблица 4-6

Выбор нормальной витковой изоляции

Испытательное напряжение обмотки, кВ	Марка провода	Толщина изоляции на две стороны, мм	Назначение
5—24	ПСД, АПСД, ПСДК и АПСДК	Круглый провод 0,23—0,33 (0,30 и 0,40), прямоугольный провод 0,39—0,48 (0,45 и 0,50)	Для сухих пожаробезопасных трансформаторов
5—85	ПЭЛБО	Круглый провод 0,17—0,21 (0,27—0,31)	Для масляных и сухих трансформаторов
	ПБ и АПБ	0,30 (0,40)	
	ПБ и АПБ	Прямоугольный провод 0,45 (0,50)	
200	ПБ и АПБ	1,25 (1,35)	Для масляных трансформаторов
325	ПБ	1,35 (1,50)	Для обычных обмоток
325	ПБ	2,00 (2,10); (3,11) 2,96	Для переплетенных обмоток

Примечания: 1. В скобках указаны расчетные размеры с учетом допусков.

2. Провод марок ПБ, АПБ, ПБУ может иметь изоляцию большей толщины согласно табл. 5-2 и 5-3.

В табл. 4-7 даны рекомендации по выбору междуслойной изоляции в многослойных цилиндрических обмотках из круглого и прямоугольного провода. Материалом является кабельная бумага марки К-120 толщиной 0,12 мм. Число слоев кабельной бумаги между двумя слоями

Таблица 4-7

Нормальная междуслойная изоляция в многослойных цилиндрических обмотках

Суммарное рабочее напряжение двух слоев обмотки, В	Число слоев кабельной бумаги на толщину листов, мм	Выступ междуслойной изоляции на торцах обмотки (на одну сторону), см
До 1000	$2 \times 0,12$	1,0
От 1001 до 2000	$3 \times 0,12$	1,6
» 2001 » 3000	$4 \times 0,12$	1,6
» 3001 » 3500	$5 \times 0,12$	1,6
» 3501 » 4000	$6 \times 0,12$	2,2
» 4001 » 4500	$7 \times 0,12$	2,2
» 4501 » 5000	$8 \times 0,12$	2,2
» 5001 » 5500	$9 \times 0,12$	2,2

Примечание. Данные таблицы приведены для трансформаторов мощностью до 630 кВ · А включительно. При мощности ст 1000 кВ · А и выше междуслойную изоляцию принимать по таблице, но не менее $6 \times 0,12$ мм; выступ изоляции не менее 2,0 см.

витков определяется по суммарному рабочему напряжению двух слоев обмотки. Высота междуслойной изоляции для увеличения пути разряда по поверхности между слоями делается большей, чем высота слоя витков.

В многослойной цилиндрической катушечной обмотке из круглого провода междуслойная изоляция имеет высоту слоя и может быть выбрана по суммарному рабочему напряжению двух слоев катушки по табл. 4-8.

Таблица 4-8

Нормальная междуслойная изоляция в многослойных цилиндрических катушечных обмотках

Рабочее напряжение двух слоев обмотки, В	Толщина изоляции, мм	Материал изоляции
До 150	$2 \times 0,05$	Телефонная бумага
От 151 до 200	$1 \times 0,2$	Кабельная бумага или
» 201 » 300	$2 \times 0,2$ или $1 \times 0,5$	электроизоляционный картон

В двухслойной цилиндрической обмотке из прямоугольного провода в масляных трансформаторах при суммарном рабочем напряжении двух слоев не более 1 кВ достаточной междуслойной изоляцией служит осевой масляный канал не менее 0,4 см шириной или прокладка из двух слоев электрокартона по 0,5 мм. При рабочем напряжении двух слоев более 1 и до 6 кВ — масляный канал 0,6—0,8 см и два слоя картона по 1,0 мм.

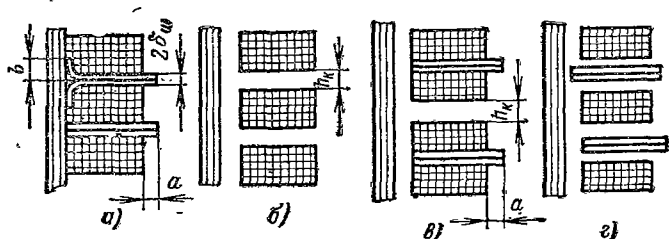


Рис. 4-9. Междукатушечная изоляция.

В сухих трансформаторах двухслойная цилиндрическая обмотка применяется для напряжений не более 1 кВ. Осевой междуслойный канал шириной 1,5—2,0 см,† необходимый при этом по условиям охлаждения, оказывается достаточным и как изоляционный промежуток.

В обмотках из прямоугольного провода — винтовой и непрерывной — междуслойная изоляция не применяется.

Междукатушечная изоляция обычно осуществляется радиальными масляными каналами (рис. 4-9, б, в), а также простыми (рис. 4-9, в) или угловыми шайбами (рис. 4-9, а).

Осевой размер масляного канала h_k , см, по рис. 4-9, б или в может быть определен по формуле

$$h_k = 0,3 \frac{2U_k}{1000} \quad (4-1)$$

где U_k — рабочее напряжение одной катушки, В.

В обмотках класса напряжения 220 кВ и более вследствие увеличения напряжения одной катушки до 3000—5000 В междукатушечную изоляцию иногда уси-

ливают электрокартонными шайбами, установленными в середине радиального масляного канала или в верхней половине канала (рис. 4-9, г).

Найденный размер канала округляют до 0,05 см и проверяют по условиям отвода тепла от обмотки (§ 9-5). Из соображений нормального охлаждения обмотки в масляных трансформаторах размер h_k следует брать не меньше чем 0,4 см. При широких катушках минимальное значение h_k по условиям отвода тепла может быть значительно больше 0,4 см.

Междувитковая изоляция в винтовых и междукатушечная в непрерывных катушечных обмотках (высота радиальных каналов h_k) сухих трансформаторов выбирается из условий нормального охлаждения обмотки по § 9-5 и обычно оказывается достаточной для обеспечения прочности изоляции.

В случае применения для междукатушечной изоляции шайб из электроизоляционного картона, простых (рис. 4-9, в) или угловых (рис. 4-9, а) между каждыми двумя соседними катушками укладываются две шайбы. Толщина шайб 0,05 см, выступ шайбы a берется обычно не менее 0,6 см. Этот способ изоляции применяется для класса напряжения не выше 35 кВ ($U_{исп} \leq 85$ кВ) в тех случаях, когда по условиям охлаждения обмотки можно закрыть шайбами все охлаждающие каналы (рис. 4-9, а) или половину каналов (рис. 4-9, в). В трехфазных трансформаторах с потерями короткого замыкания по ГОСТ 11920-73 и ГОСТ 12022-66 и во всех трансформаторах с алюминиевыми обмотками в ряде случаев половина каналов может быть закрыта при мощности трансформатора до 6300 кВ·А.

Угловые шайбы (рис. 4-9, а) применяются только в малоупотребительной многослойной цилиндрической катушечной обмотке из круглого провода. В обмотках из прямоугольного провода междукатушечная изоляция осуществляется по рис. 4-9, б или в.

В месте расположения регулировочных витков обмотки ВН в трансформаторах ПБВ (переключаемых без возбуждения) в обмотке обычно делается разрыв и увеличенный против нормального канал между катушками. Размер этого канала и его заполнение (шайбы) должны обеспечивать обмотку ВН от разряда по поверхности между двумя половинами обмотки. Выбор размеров канала должен производиться, исходя из гарантирован-

ной импульсной прочности трансформатора с учетом схемы регулирования напряжения обмотки ВН и принятой конструкции изоляции в канале. Допустимые размеры канала с учетом этих условий приведены в табл. 4-9 для схем регулирования, изображенных на рис. 4-10, и конструкции изоляции по рис. 4-11. По рис. 4-10, б и г выполняются обмотки с выводом нулевой точки на крышку трансформатора.

Таблица 4-9

Минимальные размеры канала $h_{кр}$ в месте расположения регулировочных витков обмотки ВН

Класс напряжения ВН, кВ	Схема регулирования по рис. 4-10	Изоляция в месте разрыва		Размер канала, см
		Способ изоляции	По рис. 4-11	
6	<i>a</i>	Масляный канал	<i>a</i>	0,8
	<i>б</i>	Масляный канал	<i>a</i>	1,2
10	<i>a</i>	Масляный канал	<i>a</i>	1,0
	<i>б</i>	Масляный канал	<i>a</i>	1,8
	<i>a</i>	Угловые и простые шайбы	<i>б</i>	0,6
	<i>б</i>	Угловые и простые шайбы	<i>в</i>	1,8
35	<i>в и г</i>	Масляный канал	<i>a</i>	1,2
	<i>a</i>	Масляный канал	<i>a</i>	2,5
	<i>a</i>	Угловые и простые шайбы	<i>б</i>	2,0
	<i>a</i>	Угловые и простые шайбы	<i>в</i>	2,5
110	<i>г</i>	Масляный канал с барьером из шайб	<i>г</i>	3,0 (в том числе шайба 0,5 см)

Примечания: 1. В многослойной цилиндрической обмотке с регулированием по схеме рис. 4-10, д разрыв не делается.

2. Минимальный выступ шайбы за габарит обмотки $a=0,6$ см.

3. Ширина бортика угловой шайбы $b=0,6 \div 0,8$ см.

4. Толщина угловой шайбы 0,05—0,1 см.

Наиболее употребительны схемы регулирования, показанные на рис. 4-10, *a*, *в* и *г*, при конструкции изоляции по рис. 4-11, *a* и схема на рис. 4-10, *д* без разрыва.

Остальные схемы и типы конструкции употребляются редко.

В обмотке класса напряжения 110 кВ применяется обычно схема регулирования по рис. 4-10, *г* и конструкция изоляции в разрыве обмотки по рис. 4-11, *г*. Регулировочные катушки наматываются на картонном заполнении с радиальным размером 1,0 см. В масляном канале размером 3,0 см устанавливается комплект шайб с общей толщиной 0,5 см.

Защита обмоток трансформатора от импульсных перенапряжений осуществляется различными путями. Существенную роль в повышении импульсной прочности

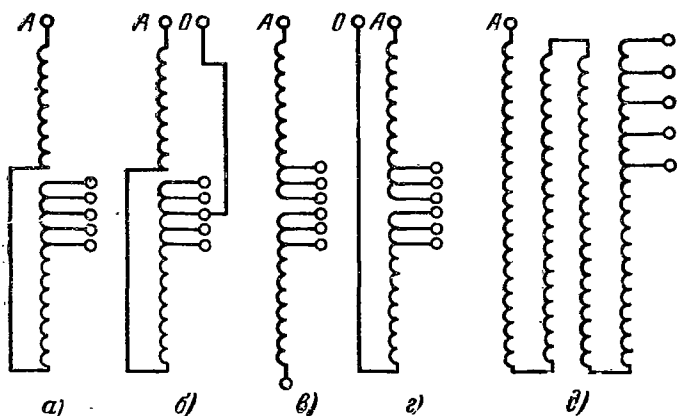


Рис. 4-10. Принципиальные схемы регулирования напряжения обмоток ВН.

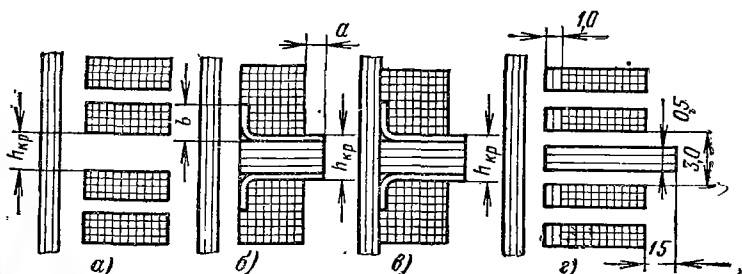


Рис. 4-11. Конструкция изоляции в месте разрыва обмотки ВН.

обмоток играет правильный выбор схемы расположения витков, слоев и катушек в сочетании с электрическими экранами, обеспечивающей наиболее благоприятное начальное распределение импульсного напряжения по обмотке и ограничивающей собственные колебания напряжения в обмотке. К числу таких схем относится схема многослойной цилиндрической обмотки, наматываемой из провода круглого или прямоугольного сечения и широко применяемой для трансформаторов классов напряжения 6, 10 и 35 кВ мощностью до 80 000 кВ·А (рис. 4-12, а). При классе напряжения 35 кВ дополни-

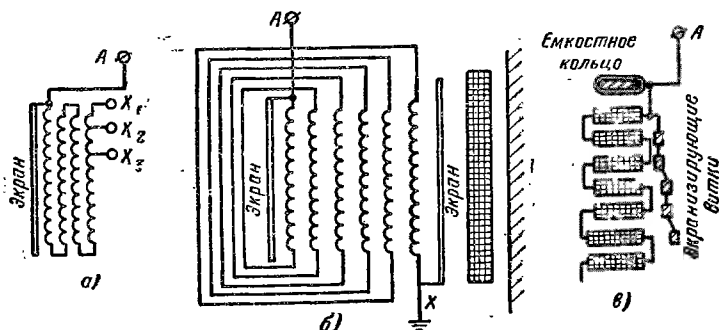


Рис. 4-12. Схемы емкостной защиты обмоток.

а — обмотки 35 кВ; б — обмотки 110—500 кВ (иностранные фирмы); в — обмотки 110 кВ.

тельная защита многослойной цилиндрической обмотки осуществляется путем применения экрана в виде незамкнутого металлического цилиндра, вложенного под внутренний слой обмотки и соединенного электрически с линейным концом, подведенным к внутреннему слою обмотки. Экран из листа немагнитного металла толщиной 0,5 мм изолируется от внутреннего слоя обмотки обычной междуслойной изоляцией. В обмотках классов напряжения 6 и 10 кВ экранирование внутреннего слоя не применяется.

Многими иностранными фирмами многослойная цилиндрическая обмотка из провода прямоугольного сечения применяется для трансформаторов мощностью десятки тысяч киловольт-ампер классов напряжения 110—500 кВ (рис. 4-12, б). Обмотка этого типа в сочетании с одним или двумя электростатическими экранами,

присоединенными к линейному концу обмотки или к линейному и нейтральному концам, дает равномерное начальное распределение напряжения и обеспечивает хорошую грозозащиту трансформатора. От схемы на рис. 4-12, а эта схема отличается наполовину меньшим напряжением между соседними слоями. Применение многослойных обмоток для мощных трансформаторов затрудняется сложностью технологии их изготовления — большой затратой ручного труда на отбортовку между-слойной изоляции, состоящей из многих слоев кабельной бумаги.

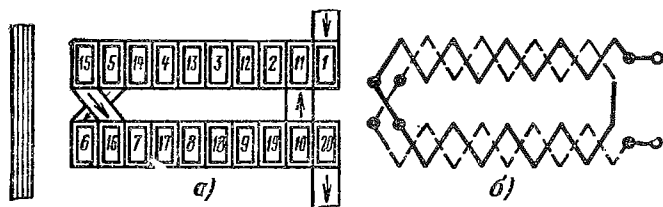


Рис. 4-13. Двойная катушка переплетенной обмотки с петлевой схемой соединения витков.

а — расположение витков; б — схема соединения витков.

В обмотках катушечных непрерывных или собираемых из отдельно намотанных катушек прибегают к экранированию начальных (у линейного конца) и иногда конечных (у нейтрали) витков и катушек обмотки фазы емкостными кольцами или экранирующими витками (рис. 4-12, в). Например, при классе напряжения 110 кВ и непрерывной обмотке в схему защиты входит кольцо с незамкнутой металлической обкладкой, изолированное снаружи кабельной бумагой и соединенное гальванически с линейным концом обмотки. Экранирующие витки — это незамкнутые витки из медного или алюминиевого провода, имеющие дополнительную изоляцию, располагаемые у начальных или конечных витков обмотки и соединенные гальванически с ее ближайшим концом.

В последние годы защита обмоток от импульсных перенапряжений при классах напряжения от 220 кВ и выше выполняется путем сочетания емкостных колец с применением переплетенных катушечных обмоток, т. е. обмоток, в которых порядок последовательного соединения витков отличается от последовательности их рас-

положения в катушках. Одна из схем переплетенной обмотки показана на рис. 4-13, а. Каждая катушка наматывается двумя параллельными проводами, а затем производится соединение этих проводов по схеме рис. 4-13, б. Возможны и другие способы переплетения витков обмотки.

Намотка переплетенной обмотки любого типа является более сложной и трудоемкой, чем намотка обычной непрерывной катушечной обмотки, эта обмотка требует увеличения электрической прочности изоляции витков и повышения плотности ее наложения, однако это усложнение технологии и увеличение стоимости обмотки окупается почти линейным начальным распределением импульсного напряжения и хорошей грозозащитой обмотки. В переплетенной обмотке отпадает необходимость в экранирующих витках, но используются емкостные кольца. Применение переплетенных обмоток в настоящее время является, по-видимому, наилучшим методом защиты от импульсных перенапряжений для обмоток классов напряжения от 220 до 750 кВ.

При воздействии на обмотку волны перенапряжения с крутым фронтом первые катушки обмотки в начале процесса испытывают наибольшие перенапряжения. В отдельных случаях наблюдается скачок напряжения на витках, близких к нейтрали. Для того чтобы обеспечить эти катушки и витки от пробоя, их изоляция усиливается по сравнению с изоляцией всех остальных катушек (витков) обмотки.

В качестве усиленной изоляции применяется увеличенная изоляция между слоями, изоляция целых катушек лакотканью или кабельной бумагой.

В обмотках классов напряжения 6, 10 и 15 кВ ($U_{исп} < 55$ кВ) усиленная изоляция, как правило, не применяется. Для обмоток классов напряжения 20 кВ и более ($U_{исп} \geq 55$ кВ) усиленная изоляция может быть выбрана по табл. 4-10.

Усиленная изоляция несколько увеличивает внутренний перепад температуры во входных катушках. Во избежание этого рекомендуется в катушках с усиленной изоляцией уменьшать плотность тока, увеличивая сечение провода по сравнению с остальными катушками обмотки на 10—15%. В обмотках из прямоугольного провода с общей толщиной изоляции провода и катушки до 1,5 мм на сторону сечение провода входных катушек

Изоляция входных витков и катушек, мм

Непрерывная катушечная обмотка

Класс напряжения, кВ	Испытательное напряжение, кВ	Первая катушка		Вторая катушка		Третья и четвертая катушки	
		витков	всей катушки	витков	всей катушки	витков	всей катушки
20	55	0,96 (1,06)	—	—	—	—	—
35	85	1,35 (1,50)	—	1,35 (1,50)	—	—	—

Ввод линейного конца в верхний конец обмотки

110	200	1,20 (1,35)	4,0	1,20 (1,35)	3,5	1,20 (1,35)	2,0
-----	-----	----------------	-----	----------------	-----	----------------	-----

Ввод линейного конца в середину высоты обмотки

110	200	1,20 (1,35)	1,0	1,20 (1,35)	3,0	1,20 (1,35)	1,5
-----	-----	----------------	-----	----------------	-----	----------------	-----

Примечания: 1. Усиленная изоляция при $U_{\text{исп}}=55$ кВ делается на первой (линейный конец) и последней (нейтраль) катушках обмотки фазы. При $U_{\text{исп}}=85$ кВ — на двух первых и двух последних катушках. При $U_{\text{исп}}=200$ кВ только на двух первых

2. В обмотках классов напряжения 20 и 35 кВ два крайних канала между катушками вверх и вниз не менее 0,7 см каждый.

3. В многослойной цилиндрической обмотке класса напряжения 35 кВ с экраном пять последних витков у нейтрали на каждой ступени имеют усиленную изоляцию — один слой лакокраски ЛХММ вполуперекрышку.

4. Изоляция витков дана на две стороны; изоляция катушек на одну.

5. Вне скобок указана номинальная толщина изоляции витков. Размеры катушки рассчитываются по толщине изоляции, указанной в скобках.

может оставаться таким же, как и в других катушках обмотки.

В некоторых новых сериях трансформаторов класса напряжения 35 кВ с непрерывными катушечными обмотками ВН усиленная изоляция катушек у линейного и нейтрального концов обмотки не применяется.

III. Изоляция отводов трансформатора. Отводы, т. е. проводники, соединяющие обмотки трансформатора между собой, с проходными изоляторами на крышке (вводами) и с переключателями, а также переключатели обычно располагаются в масле, в пространстве между обмоткой и стенкой бака или между ярмом и крышкой бака. Отводы и переключатели каждой обмотки должны быть надежно изолированы от бака, заземленных частей, крепящих остоов (прессующие балки ярма, заземленные болты и т. д.), а также от всех частей, находящихся под напряжением, т. е. обмоток и других отводов.

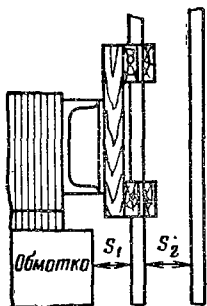


Рис. 4-14. Отвод между обмоткой и стенкой бака.

Типичный случай расположения отвода показан на рис. 4-14. При расчете изоляции следует проверять как размеры чистых масляных промежутков (s_1 и s_2 на рис. 4-14), так и возможные пути разряда по поверхности изоляционных деталей, например деревянных деталей крепления отводов. Определение допустимых изоляционных расстояний и дополнительной твердой изоляции отводов обмотки ВН производится по испытательному напряжению отвода (обмотки, от которой идет отвод) при 50 Гц по табл. 4-11 для изоляции отвода от бака и других заземленных деталей и от собственной (наружной) обмотки. Изоляция отводов внутренних обмоток НН и СН от стенки бака и заземленных деталей выбирается по табл. 4-11, а от наружной обмотки ВН по табл. 4-12.

В этих таблицах приведены ориентировочные основные размеры изоляционных промежутков, которые могут быть приняты в расчете при предварительном определении внутренних размеров бака трансформатора.

В табл. 4-11 и 4-12 минимально допустимый масляный промежуток s , см, определяется как сумма мини-

Минимально допустимые изоляционные расстояния
от отводов до заземленных частей

$U_{\text{ист. отвода, кВ}}$	Толщина изоля- ции на одну сто- рону, см	Диаметр стерж- ня, см	Расстояние от глад- кой стенки бака или собственной обмот- ки, см			Расстояние от за- земленной части острой формы, см		
			$s_{\text{н}}$	$s_{\text{к}}$	s	$s_{\text{н}}$	$s_{\text{к}}$	s
До 25	0	$< 0,6$	1,5	1,0	2,5	1,5	0,5	2,0
	0	$> 0,6$	1,2	1,0	2,2	1,2	0,5	1,7
	0,2	—	1,0	1,0	2,0	1,0	0,5	1,5
35	0	$< 0,6$	2,3	1,0	3,3	2,0	0,5	2,5
	0	$> 0,6$	1,8	1,0	2,8	1,7	0,5	2,2
	0,2	—	1,0	1,0	2,0	1,2	0,5	1,7
45	0	$< 0,6$	3,2	1,0	4,2	2,8	0,5	3,3
	0	$> 0,6$	2,7	1,0	3,7	2,5	0,5	3,0
	0,2	—	1,5	1,0	2,5	1,8	0,5	2,3
55	0	$< 0,6$	4,0	1,0	5,0	3,3	0,5	3,8
	0	$> 0,6$	3,5	1,0	4,5	3,2	0,5	3,7
	0,2	—	2,2	1,0	3,2	2,5	0,5	3,0
85	0,2	—	4,0	1,0	5,0	4,5	0,5	5,0
	0,4	—	3,0	1,0	4,0	3,7	0,5	4,2
	0,6	—	2,5	1,0	3,5	3,5	0,5	4,0
100	0,5		4,0	1,0	5,0	4,5	1,0	5,5
200	2,0	1,2	7,5	2,0	9,5	16,0	1,0	17,0*
	2,0	1,2	7,5	2,0	9,5	10,5	1,0	11,5**

* Заземленная часть не изолирована.

** Заземленная часть изолирована щитом из электрокартона толщиной 0,3 см.

мального изоляционного промежутка $s_{\text{н}}$ и суммарного допуска на изготовление соответствующих деталей трансформатора $s_{\text{к}}$. Найденный по таблицам допустимый промежуток s следует понимать как чисто масляный промежуток в свету между изоляцией отвода и соответствующей деталью или ее изоляцией. В том случае, если часть изоляционного промежутка заполнена изоляционными деталями, по поверхности которых может пройти путь разряда, эквивалентный чисто масляный промежуток определяется по формуле

$$s = s_{\text{м}} + 0,4s_{\text{д}} + 0,67s_{\text{т.н.}} \quad (4-2)$$

где s_m — действительный чисто масляный промежуток, см;

s_d — длина пути разряда по поверхности дерева, см;

$s_{т.н}$ — длина пути разряда по поверхности твердой изоляции: электроизоляционного картона, лакоткани, кабельной бумаги, бумажно-бакелитовых изделий, гетинакса, см.

Найденное по (4-2) s должно быть не меньше, чем определенное по табл. 4-11 или 4-12.

Таблица 4-12

Минимально допустимые изоляционные расстояния
от отвода до обмотки

Испытательное напряжение, кВ		Толщина изоляции на одну сторону, см	s_n — изоляционное расстояние отвода, см		s_k — суммарный допуск, см	s — минимальное расчетное расстояние, см	
обмотки	отвода		до входных катушек	до основных катушек		до входной катушки	до основных катушек
До 25	До 25	Нет	—	1,5	1,0	—	2,5
		0,2	—	1,0	1,0	—	2,0
35	До 35	Нет	—	2,3	1,0	—	3,3
		0,2	—	1,0	1,0	—	2,0
55	До 35	Нет	—	4,0	1,0	—	5,0
		0,2	—	2,0	1,0	—	3,0
85	До 35	Нет	—	8,0	1,0	—	9,0
		0,2	—	4,0	1,0	—	5,0
200	До 100	0,3	20,5	23,0	2,0	22,5	25,0
		0,6	15,0	17,0	2,0	17,0	19,0
		0,8	12,5	14,0	2,0	14,5	16,0
200	200	2,0	8,0	9,0	1,5	9,5	10,5

Для отводов с $U_{исп} \leq 35$ кВ может применяться медный или алюминиевый провод, изолированный кабельной бумагой или бумажно-бакелитовыми трубками. При рабочем напряжении отвода до 1 кВ (испытательное

напряжение 5 кВ) провод (шина) отвода собственной изоляции не имеет.

В трансформаторах класса напряжения 110 кВ при расположении отводов между наружной обмоткой и стенкой бака могут быть два случая. В трансформаторах, переключаемых без возбуждения (ПБВ), внешняя обмотка ВН имеет испытательное напряжение 200 кВ и расстояния отводов ВН от стенки бака или собственной обмотки выбираются по этому напряжению по табл. 4-11,

а расстояния отводов, идущих от обмоток СН и НН до обмотки ВН, выбираются по табл. 4-12. В трансформаторах, регулируемых под нагрузкой (РПН), наружной частью обмотки ВН является обмотка тонкого регулирования, испытательное напряжение которой равно 100 кВ. Расстояние

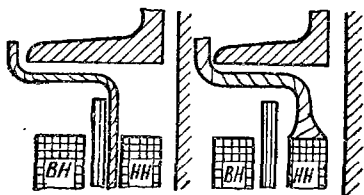


Рис. 4-15. Вывод отводов от обмотки НН.

линейного отвода обмотки ВН при этом выбирается как для отвода с испытательным напряжением 200 кВ вблизи обмотки с испытательным напряжением 200 кВ по табл. 4-12. Расстояния отводов СН и НН от регулировочной части обмотки ВН выбираются как для отводов с испытательным напряжением 100 кВ по табл. 4-11.

При проходе через деревянные детали отводы с $U_{исп} = 25$ и 35 кВ, не имеющие собственной изоляции, должны быть изолированы картоном толщиной 0,2 см на сторону; отводы обмоток с $U_{исп} = 200$ кВ получают в этом случае дополнительную изоляцию на сторону 0,6 см.

Отвод от внутренней обмотки трансформатора (обычно обмотка НН или СН) в некоторых случаях может располагаться в осевом канале между обмотками или между обмоткой и стержнем. При выходе в пространство между активной частью трансформатора и баком такой или любой другой отвод от внутренней обмотки должен пройти между наружной обмоткой и прессующей балкой ярма (рис. 4-15). Изоляция отвода в этом случае определяется испытательным напряжением при частоте 50 Гц. Отвод изолируется кабельной бумагой или лакокрасочным покрытием и дополнительно защищается коробкой из элек-

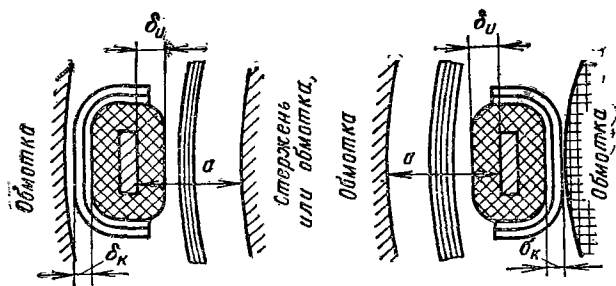


Рис. 4-16. Изоляция отводов в осевых каналах обмоток.

троизоляционного картона. Размеры изоляции и минимально допустимые расстояния определяются по испытательному напряжению той обмотки, от которой идет отвод, если ее напряжение выше напряжения другой обмотки или если определяется изоляция отвода от заземленной детали. При определении изоляции отвода, лежащего в осевом канале, до другой обмотки толщина покрытия отвода определяется по испытательному на-

Таблица 4-13

Минимальное расстояние от внутренних отводов до других обмоток и заземленных деталей

Испытательное напряжение на промежутке, кВ	До 25	35	45	55	85	200	230
Расстояние a от металла отвода до соседней обмотки или стержня, см	0,9	1,2	1,5	1,9	2,7	5,5	6,0

Таблица 4-14

Толщина изоляции на внутренних отводах

Испытательное напряжение обмотки, от которой идет отвод, $U_{исп}$, кВ	Толщина изоляции на одну сторону $\delta_{и}$, см	Толщина коробки из картона $\delta_{к}$, см
До 25	0,15	0,25
25	0,3	0,25
45	0,4	0,25
85	0,8	2×0,25

пряжению обмотки, от которой идет отвод, а расстояние до другой обмотки — по наибольшему из двух испытательных напряжений обмоток.

Для определения размеров изоляции и минимальных расстояний отводов, расположенных в осевых каналах, можно пользоваться табл. 4-13, 4-14 и рис. 4-16.

Изоляция в месте выхода его между обмоткой ВН и прессующей балкой ярма (рис. 4-15) может быть определена по табл. 4-13 и 4-14 при условии, что коробка из электроизоляционного картона укладывается с двух сторон — со стороны обмотки ВН и со стороны балки толщиной δ_k на каждой стороне.

4-6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ РАССТОЯНИЙ В СУХИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Главная изоляция в сухих трансформаторах осуществляется обычно при помощи таких же изоляционных конструктивных деталей, как и в масляных трансформаторах: изоляционных цилиндров, угловых шайб, междуфазных перегородок и т. д. При конструировании сухих трансформаторов наряду с обеспечением электрической прочности следует обращать особое внимание на получение достаточных воздушных охлаждающих каналов между обмотками и такое расположение изоляционных деталей (угловых шайб и т. д.), при котором обеспечивается наилучший доступ воздуха к обмоткам. Основные изоляционные расстояния главной изоляции (рис. 4-17) могут быть выбраны по табл. 4-15 и 4-16.

Междувитковая изоляция сухих трансформаторов обычно достаточно надежно обеспечивается нормальной изоляцией провода. В качестве междукатушечной изоляции могут служить горизонтальные воздушные каналы,

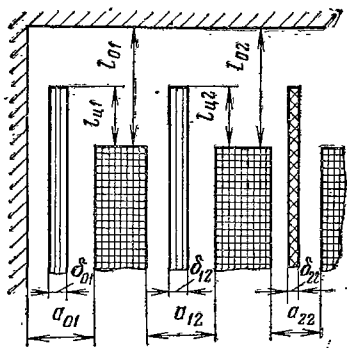


Рис. 4-17. Главная изоляция обмоток сухих трансформаторов.

Изоляция обмоток ВН сухих трансформаторов, см

$U_{\text{исп}}$ для ВН, кВ	ВН от ярма l_{02}	Между ВН и НН			Между ВН и ВН	
		a_{12}	δ_{12}	l_{12}	a_{22}	δ_{22}
3	1,5	1,0	Картон $2 \times 0,5$ мм		1,0	—
10	2,0	1,5	0,25	1,0	1,0	0,2
16	4,5	2,2	0,4	2,5	2,5	0,3
24	8,0	4,0	0,5	4,0	4,5	0,3

Таблица 4-16

Изоляция обмоток НН сухих трансформаторов, см

$U_{\text{исп}}$ для НН, кВ	НН от ярма l_{01}	НН от стержня		
		a_{01}	δ_{01}	l_{01}
3	1,5	1,0	Картон $2 \times 0,5$ мм	
10	3,0	1,4	0,25	1,5
16	3,5	2,7	0,50	3,0
24	9,0	4,0	0,60	4,0

Примечание к табл. 4-15 и 4-16. Указанные в таблицах размеры каналов a_{01} и a_{12} являются минимальными с точки зрения изоляции обмоток. Эти размеры должны быть также проверены по условиям отвода тепла по табл. 9-2.

Примечание к табл. 4-16. Для винтовой обмотки при $U_{\text{исп}}$ для НН 3 кВ ставить цилиндр $\delta_{01}=0,25 \div 0,5$ мм и принимать a_{01} не менее 2,0 см.

размеры которых определяются по условиям отвода тепла по табл. 9-2.

Междуслойная изоляция в многослойных цилиндрических обмотках сухих трансформаторов может выполняться из стеклолакоткани на битумных лаках марки ДСБ-120/130 с толщиной полотна 0,15 мм (ГОСТ 10156-70). При рабочем напряжении двух слоев обмотки 1000—2000 В следует проложить три слоя по 0,15 мм; при напряжении 2001—3000 В — четыре слоя по 0,15 мм и при напряжении 3001—3500 В — пять слоев по 0,15 мм. Выступ междуслойной изоляции за торцы обмотки 2,0 см. Структура изоляции на торцах по рис. 5-25.

Сухие трансформаторы устанавливаются внутри помещений, подводка линии высшего напряжения к ним

осуществляется кабелем. Поэтому изоляция сухих трансформаторов испытывает коммутационные перенапряжения, но практически свободна от воздействия атмосферных перенапряжений.

Минимальные расстояния между токоведущими и заземленными частями в сухом трансформаторе (отвод ВН — отвод НН; отвод ВН — заземленная шпилька; отвод ВН — обмотка ВН; отвод ВН — стенка кожуха и т. д.) можно принять следующими: при чисто воздушном промежутке при рабочем напряжении 6 кВ 5 см, при 10 кВ 8 см; при наличии барьера 0,2 см или покрытия той же толщины на одном из электродов соответственно 4 и 6 см. Допустимое расстояние по поверхности твердого диэлектрика (электроизоляционный картон, гетинакс и др., но не дерево) при рабочем напряжении 6 и 10 кВ около 10 см.

Глава пятая

ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРОВ

5-1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ОБМОТКАМ ТРАНСФОРМАТОРА

Общие требования, предъявляемые к обмоткам трансформатора, можно подразделить на эксплуатационные и производственные.

Основными эксплуатационными требованиями являются электрическая и механическая прочность и нагревостойкость как обмоток, так и других частей и всего трансформатора в целом. Изоляция обмоток и других частей трансформатора должна выдерживать без повреждений коммутационные и атмосферные перенапряжения, которые могут возникнуть в сети, где трансформатор будет работать. Механическая прочность обмоток должна гарантировать их от механических деформаций и повреждений при токах короткого замыкания, многократно превышающих номинальный рабочий ток трансформатора.

Нагрев обмоток и других частей от потерь, возникающих в трансформаторе при нормальной работе и коротких замыканиях ограниченной длительности, не должен приводить изоляцию обмоток и других частей, а

также масло трансформатора к тепловому износу или разрушению в сроки более короткие, чем обычный срок службы трансформатора (20—25 лет).

Общие эксплуатационные требования, предъявляемые к трансформаторам и их обмоткам, регламентированы соответствующими и общесоюзными стандартами на силовые трансформаторы общего назначения, на различные специальные трансформаторы, на электрические испытания изоляции трансформаторов и т. д. Практически электрическая прочность изоляции обмоток достигается рациональной ее конструкцией, правильным выбором изоляционных промежутков и изоляционных материалов и прогрессивной технологией обработки изоляции при высокой общей культуре производства. Требование механической прочности обмотки удовлетворяется путем рациональной организации поля рассеяния, т. е. правильного выбора типа и конструкции обмотки и расположения ее витков и катушек с таким расчетом, чтобы возникающие в этой обмотке механические силы были по возможности меньшими, а механическая стойкость возможно большей.

Для достижения необходимой нагревостойкости следует обеспечить свободную теплоотдачу в окружающую среду всего тепла, выделяющегося в обмотках при допустимых для данного класса нагревостойкости изоляции превышениях температуры обмоток над температурой окружающей среды, т. е. обеспечить достаточно большую поверхность соприкосновения обмотки с охлаждающей средой — маслом или воздухом.

Общие производственные требования сводятся к изготовлению трансформатора с наименьшей затратой материалов, труда и наиболее простого по конструкции, обеспечивающего соблюдение всех эксплуатационных требований. Эти требования, предъявляемые к трансформатору в целом, в полной мере относятся и к обмоткам. Задачей проектировщика является разумное сочетание интересов эксплуатации и производства. Эта задача решается в значительной мере при выборе того или иного типа обмотки. Поэтому на выбор типа обмотки, наиболее полно отвечающей требованиям эксплуатации и в то же время простой и дешевой в производстве, следует обращать особое внимание. Практические указания по этому вопросу даются ниже в характеристиках различных типов обмоток.

В процессе расчета обмотки после выбора ее типа следует добиваться наибольшей компактности в ее размещении, распределении витков и катушек, с тем чтобы получить наилучшее заполнение окна трансформатора.

Одновременно следует стремиться к получению достаточно развитой поверхности охлаждения обмотки и достаточного числа и размеров масляных (воздушных у сухого трансформатора) охлаждающих каналов в обмотках при обеспечении наименьшего сопротивления для движения в них охлаждающей среды, что дает возможность уменьшить внутренний перепад температуры в обмотках и как следствие этого несколько уменьшить охлаждаемую поверхность бака трансформатора.

5-2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ДЕТАЛИ ОБМОТОК И ИХ ИЗОЛЯЦИИ

Основным элементом всех обмоток трансформаторов является виток (см. § 2-1). В зависимости от тока нагрузки виток может быть выполнен одним проводом круглого сечения или проводом прямоугольного сечения, наконец, при достаточно больших токах — группой па-

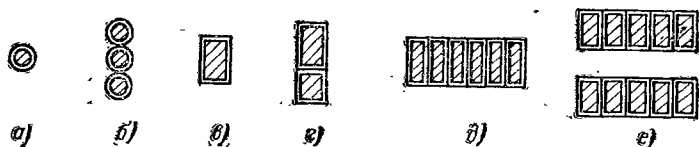


Рис. 5-1. Формы сечения витка обмотки при различных размерах поперечного сечения и различном числе параллельных проводов.

раллельных проводов круглого или, чаще, прямоугольного сечения. На рис. 5-1 представлены различные варианты поперечных сечений одного витка обмотки при различных токах нагрузки. Эти варианты не являются исчерпывающими.

Ряд витков, намотанных на цилиндрической поверхности, называется слоем. В некоторых типах обмоток слой может состоять из нескольких десятков или сотен витков, в других — из нескольких витков или даже из одного витка.

Отдельные витки обмотки группируются в катушки. Катушкой называется группа последовательно соединенных витков обмотки, конструктивно объединенная и отделенная от других таких же групп или от других обмоток трансформатора. Обмотка стержня может состоять из одной, двух или нескольких катушек. Катушка может состоять из ряда слоев или только из одного слоя витков. Число витков в катушке может быть различным — как целым, так и дробным, однако должно быть больше

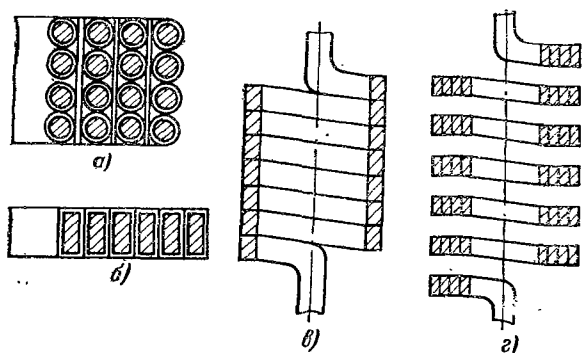


Рис. 5-2. Различные типы катушек.

а — катушка из шестнадцати витков; *б* катушка из шести витков; *в* — катушка из семи витков; *г* — катушка из шести витков (четыре параллельных провода).

единицы. На рис. 5-2 представлены поперечные сечения нескольких различных типов катушек.

Для обеспечения надлежащей электрической прочности обмотки между ее витками, катушками, а также между обмоткой и другими частями трансформатора должны быть выдержаны определенные изоляционные расстояния, зависящие от рабочего напряжения и гарантирующие обмотку от пробоя изоляции как при рабочем напряжении, так и при возможных перенапряжениях. В этих промежутках могут быть установлены изоляционные конструкции или детали из твердого диэлектрика, либо промежутки могут быть заполнены только изолирующей средой — маслом, воздухом и т. д. Для нормального охлаждения между обмоткой и другими частями трансформатора, между катушками, а в некоторых конструкциях и между витками делают масляные или воз-

душные охлаждающие каналы. В одних случаях охлаждающие каналы обеспечивают одновременно и надежную изоляцию обмотки, в других для усиления изоляции применяются специальные изоляционные детали — простые и угловые шайбы, изоляционные цилиндры, перегородки и т. д.

Во всех типах обмоток принято различать осевое и радиальное направления. Осевым считается направление, параллельное оси стержня трансформатора, на котором устанавливается данная обмотка. Радиальным считается направление любого радиуса окружности обмотки. В нормальных силовых масляных трансформаторах с вертикальным расположением стержней осевое направление совпадает с вертикальным, а радиальное — с горизонтальным. В этом смысле принято говорить также об осевых и радиальных каналах. На рис. 5-3 изображена обмотка, состоящая из семи катушек, намотанных на изоляционном цилиндре. Между обмоткой и цилиндром сделан осевой изоляционный охлаждающий канал. Между всеми катушками — радиальные каналы.

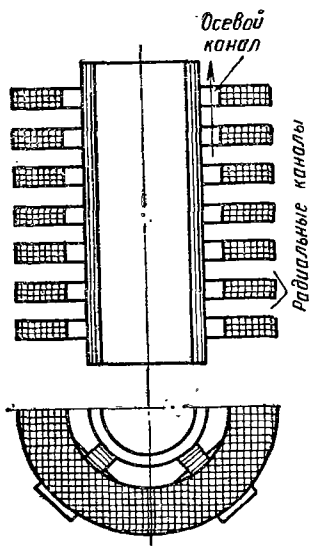


Рис. 5-3. Осевое и радиальное направления в обмотке.

По направлению намотки подобно резьбе винта различают обмотки правые и левые (рис. 5-4). Однослойные обмотки, имеющие в одном слое более одного витка (рис. 5-4, а), остаются левыми или правыми в зависимости от того, как они намотаны, но независимо от того, какой конец — верхний или нижний — считается входным. В обмотках, состоящих из нескольких таких слоев, с переходами из слоя в слой по рис. 5-4, б направление намотки слоев будет чередоваться. Если первый (внутренний) слой левый, то все другие нечетные слои также будут левыми, а все четные — правыми. Для таких обмоток за начало при определении направления намотки обычно принимается начало первого (внутреннего) слоя и направление намотки всей обмотки считается по направлению намотки этого слоя.

Отдельные катушки, имеющие форму плоской спирали, будут условно считаться правыми или левыми в зависимости от того, какой конец — внутренний или наружный — считать входным, а также

в зависимости от того, с какой стороны на них смотреть. Нетрудно убедиться, что такая катушка «левой» намотки, изображенная на рис. 5-4, в, станет «правой», если ее повернуть к наблюдателю другой стороной. Если по технологическим соображениям обмотка состоит из таких отдельно наматываемых одинаковых катушек, то одного указания «правая» или «левая» обмотка недостаточно,

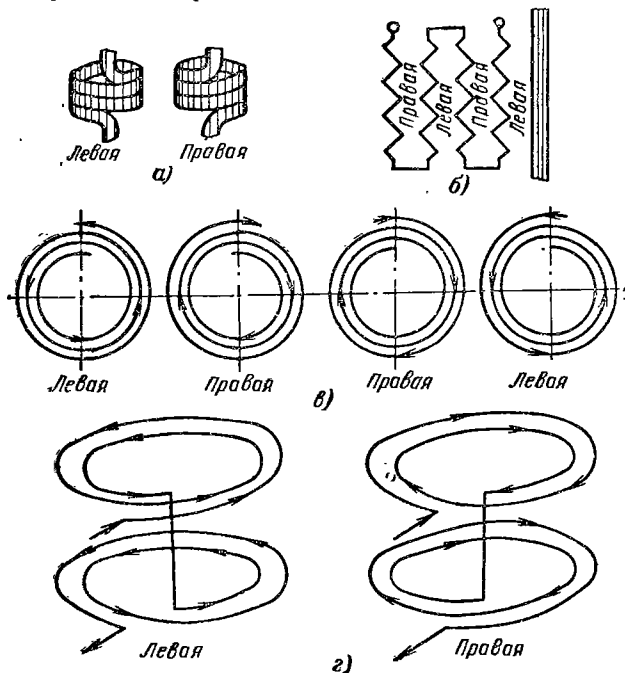


Рис. 5-4. Обмотки левой и правой намоток.

а — цилиндрическая однослойная; *б* — цилиндрическая многослойная; *в* — одинарные катушки катушечной обмотки; *г* — двойные катушки катушечной обмотки.

В этом случае во избежание ошибок указания по направлению обмотки лучше всего давать в виде эскиза. Обычно такие катушки применяются парами (двойная катушка). При этом входными и выходными являются наружные концы, а переход из катушки в катушку производится внутри катушек (рис. 5-4, г) и направление намотки является определенным и независимым от точки зрения наблюдателя. Обмотка, составленная из любого числа последовательно соединенных двойных катушек одинаковой намотки, будет иметь то же направление намотки, что и отдельные двойные катушки. Это положение остается справедливым для непрерывных катушечных обмоток, где каждые две соседние катушки могут рассматриваться как одна двойная катушка, а также для многослойных цилиндриче-

ских катушечных обмоток, где входным обычно считают наружный слой катушки.

Правильный выбор направления намотки имеет существенное значение для получения заданной группы соединений обмоток, а в однофазных трансформаторах — также для правильного соединения частей обмоток, расположенных на разных стержнях. Большинство обмоток трансформаторов обычно выполняется левой намоткой, более удобной для обмотчика, работающего в основном правой рукой.

В большинстве случаев в качестве витковой изоляции в обмотках трансформаторов используется собственная изоляция обмоточного провода. В масляных трансформаторах обычно применяется медный или алюминиевый обмоточный провод с эмалевой, хлопчатобумажной или бумажной изоляцией.

Круглый медный провод марки ПЭЛБО по ГОСТ 16507-70 диаметром от 0,38 до 1,16 мм и сечением от 0,1134 до 1,06 мм² изолируется масляным лаком и одним слоем нитей из хлопчатобумажной пряжи и относится к классу нагревостойкости А (105°C по ГОСТ 8865-70). Общая номинальная толщина изоляции на две стороны от 0,17 до 0,23 мм. Сортамент этого провода приведен в табл. 5-1.

Медный обмоточный провод круглого и прямоугольного сечения марки ПБ, изолированный лентами кабельной бумаги, класса нагревостойкости А (105°C) выпускается в соответствии с ГОСТ 16512-70. Удвоенная номинальная толщина (на две стороны) изоляции круглого провода от 0,30 до 5,76 мм, прямоугольного провода — от 0,45 до 1,92 мм. Диаметры проволоки круглого провода от 1,20 до 5,20 мм с сечениями от 1,131 до 21,22 мм². Прямоугольный провод имеет размеры сечения: меньший — от 1,00 до 5,6 мм, больший — от 3,00 до 19,5 мм. Эти размеры сечения согласованы с рекомендацией МЭК (Международная электротехническая комиссия). В силовых трансформаторах применяется главным образом провод с размерами: меньшим — от 1,40 до 5,6 и большим — от 3,75 до 15,0 мм с сечением от 5,035 до 83,14 мм². Сортамент прямоугольного медного провода приведен в табл. 5-2.

В ГОСТ 16512-70 предусмотрен также выпуск медного провода с размерами сечения: меньшим — от 1,8 до 5,6 и большим — от 6,7 до 19,5 мм, изолированного лентами кабельной высоковольтной уплотненной бумаги, марки ПБУ с удвоенной номинальной толщиной изоляции от 2,00 до 4,4 мм.

Таблица 5-1

Номинальные размеры, сечения и изоляция круглого медного и алюминиевого обмоточного провода

Диаметр, мм	Сечение, мм ²	Изоляция 2θ, мм	Увеличение мас-сы, %	Диаметр, мм	Сечение, мм ²	Изоляция 2θ, мм	Увеличение мас-сы, %	Диаметр, мм	Сечение, мм ²	Изоляция 2θ, мм	Увеличение мас-сы, %
Марка ПЭЛБО — медь				Марка ПЭЛБО — медь				Марки ПБ — медь и АПБ — алюминий			
0,38	0,1134	0,17 (0,27)	14	0,93	0,679	0,21 (0,31)	6,0	1,88	2,78	0,30 (0,40)	3,5
0,41	0,132		13,5	0,96	0,724		5,5	1,95	2,99		3,5
0,44	0,1521		12	1,00	0,785		5,5	2,02	3,20		3,0
0,47	0,1735		11,5	1,04	0,843		5,0	2,10	3,46		3,0
0,49	0,1886		11	1,08	0,916		5,0	2,26	4,01		3,0
0,51	0,204		11	1,12	0,935		5,0	2,44	4,68		2,5
0,53	0,221		10	1,16	1,03		5,0	2,63	5,43		2,5
0,55	0,238		10	Марка ПБ — медь				2,83	6,29		2,5
0,57	0,255		9,5	1,20	1,131	0,30	6,0	3,05	7,31		2,5
0,59	0,273		9,0	1,25	1,23	(0,40)	5,5	3,23	8,41		2,0
0,62	0,302	8,5	1,25	1,23	(0,40)	5,5	3,53	9,69	2,0		
0,64	0,322	8,5	1,30	1,33		5,5	3,80	11,34	1,5		
0,67	0,353	8,0	Марки ПБ — медь и АПБ — алюминий				4,10	13,2	1,5		
0,69	0,374	8,0	1,35	1,43	0,30 (0,40)	5,0	4,50	15,9	1,5		
0,72	0,407	0,18 (0,28)	7,5	1,40		1,54	5,0	4,80	18,09		1,5
	7,5		1,45	1,65		5,0	5,00	19,63	1,5		
	7,0		1,50	1,77		4,5	5,20	21,22	1,5		
	7,0		1,56	1,91		4,5	Марка АПБ — алюминий				
	6,5		1,62	2,06		4,0	6,00	23,26	0,30 (0,40)	1,5	
	6,5		1,68	2,22		4,0					
	6,0		1,74	2,38	4,0						
	6,0		1,81	2,57	3,5						

Примечания: 1. Провод марок ПБ и АПБ всех диаметров может быть получен с изоляцией на две стороны 2θ=0,30 (0,40), 0,72 (0,82), 0,96 (1,06) и 1,20 (1,35) мм и провод с диаметром большим, чем 2,10 мм, также с изоляцией 1,68 (1,83), 1,92 (2,07), 2,88 (3,08), 4,08 (4,33) и 5,76 (6,11) мм.

2. Вне скобок указана номинальная толщина изоляции. Размеры катушек считать по толщине, указанной в скобках и учитывающей предельные отклонения от номинальных размеров проволоки и изоляции и неплотность намотки обмотки.

3. Увеличение массы провода за счет изоляции дано для медного провода. Для алюминиевого провода марки АПБ данные таблицы по увеличению массы умножить на 3,3.

4. Увеличение массы проводов марок ПБ и АПБ с усиленной изоляцией принимать по табл. 5-4 с учетом примечания 3 табл. 5-1.

5. Провод марок ПСД и ПСДК выпускается в пределах диаметров от 0,38 до 5,2 мм, провод марок АПСД и АПСДК от 1,35 до 5,2 мм.

6. Номинальная толщина изоляции провода марок ПСД, ПСДК, АПСД и АПСДК при диаметре провода до 2,1 мм от 0,23 до 0,27 мм (в расчете принимать 0,30 мм); при диаметре от 2,26 и выше 0,33 мм (в расчете принимать 0,40 мм).

7. Для проводов марок ПСД и ПСДК данные таблицы по увеличению массы умножать на 1,75 для диаметров от 1,2 до 2,10 мм и на 2,1 для диаметров от 2,26 мм и выше; для провода марки ПДА соответственно на 1,5 и 1,75. Для алюминиевых проводов марок АПСД и АПСДК учитывать примечание 3.

Алюминиевый обмоточный провод марки АПБ круглого и прямоугольного сечения, изолированный лентами кабельной бумаги, класса нагревостойкости А (105°C) выпускается в соответствии с ГОСТ 16512-70. Номинальная удвоенная толщина изоляции такая же, как у медного провода марки ПБ. Диаметр проволоки круглого провода от 1,35 до 8,0 мм. Прямоугольный провод имеет размеры: меньший — от 1,81 до 7,0 мм, больший — от 4,1 до 18,0 мм с сечениями от 7,21 до 125,1 мм². Алюминиевый провод марки АПБУ, изолированный лентами кабельной высоковольтной уплотненной бумаги, выпускается с размерами сечения: меньшим — от 1,81 до 5,5 и большим — от 6,9 до 22,0 мм с той же толщиной изоляции, что и медный провод марки ПБУ. Сортамент алюминиевого круглого провода приведен в табл. 5-1, прямоугольного — в табл. 5-3.

До 1976 г. ГОСТ 16512-70 допускает выпуск прямоугольного медного обмоточного провода марки ПБ с размерами сечения, соответствующими требованиям ранее действовавшего ГОСТ 6324-52. Сортамент этого провода по размерам сечения частично совпадает с сортаментом алюминиевого обмоточного провода по ГОСТ 16512-70 и приведен в табл. 5-3.

В сухих трансформаторах может применяться провод тех же марок, что и в масляных. Однако при необходимости получения пожаробезопасной установки, а также при расчете обмоток на работу при повышенной температуре обычно применяют провода других марок с изоляцией повышенной нагревостойкости. К этим маркам медного провода относятся (ГОСТ 7019-71): марка ПСД — провод с изоляцией из бесщелочного стекловолокна, наложенного двумя слоями с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком, класса нагревостойкости F (155°C); марка ПСДК — с той же изоляцией, но с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком, класса нагревостойкости H (180°C) и марка ПДА — провод с изоляцией из дельта-асбестовой ровницы, наложенной одним слоем с подклейкой и пропиткой нагревостойким лаком, класса нагревостойкости F (155°C).

Номинальная удвоенная толщина изоляции провода ПСД и ПСДК круглого с диаметром от 0,31 до 5,20 мм от 0,23 до 0,33 мм; прямоугольного с размером большей стороны сечения от 3,75 до 12,5 мм от 0,39 до 0,48 мм. С такой же изоляцией выпускается круглый и прямо-

Номинальные размеры и сечения прямоугольного

Размеры a и b — в мм,

$\begin{array}{c} a \\ b \end{array}$	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12	2,24	2,36	2,50	2,65
3,75	5,04	—	5,79	—	6,39	—	7,14	—	8,04	—	8,83	—
4,00	5,39	5,79	6,19	6,44	6,84	7,24	7,64	8,12	8,60	8,89	9,45	10,1
4,25	5,74	—	6,59	—	7,29	—	8,14	—	9,16	—	10,1	—
4,50	6,09	6,54	6,99	7,29	7,74	8,19	8,64	9,18	9,72	10,1	10,7	11,4
4,75	6,44	—	7,39	—	8,19	—	9,14	—	10,3	—	11,3	—
5,00	6,79	7,29	7,79	8,14	8,64	9,14	9,64	10,2	10,8	11,3	12,0	12,7
5,30	7,21	—	8,27	—	9,18	—	10,2	—	11,5	—	12,7	—
5,60	7,63	8,19	8,75	9,16	9,72	10,3	10,8	11,5	12,2	12,7	13,5	14,3
6,00	8,19	—	9,39	—	10,4	—	11,6	—	13,1	—	14,5	—
6,30	8,61	9,24	9,87	10,4	11,0	11,6	12,2	13,0	13,8	14,3	15,2	16,2
6,70	9,17	—	10,5	—	11,7	—	13,0	—	14,7	—	16,2	—
7,10	9,73	10,4	11,2	11,7	12,4	13,1	13,8	14,7	15,5	16,2	17,2	18,3
7,50	10,3	—	11,8	—	13,1	—	14,6	—	16,4	—	18,2	—
8,00	11,0	11,8	12,6	13,2	14,0	14,8	15,6	16,6	17,6	18,3	19,5	20,7
8,50	11,7	—	13,4	—	14,9	—	16,6	—	18,7	—	20,7	—
9,00	12,4	13,3	14,2	14,9	15,8	16,7	17,6	18,7	19,8	20,7	22,0	23,3
9,50	13,1	—	15,0	—	16,7	—	18,6	—	20,9	—	23,2	—
10,0	13,8	14,8	15,8	16,6	17,6	18,6	19,6	20,8	22,0	23,1	24,5	26,0
10,6	14,6	—	16,8	—	18,7	—	20,8	—	23,4	—	26,0	—
11,2	15,5	16,6	17,7	18,7	19,8	20,9	22,0	23,4	24,7	25,9	27,5	29,1
11,8	—	—	18,7	—	20,9	—	23,2	—	26,1	—	29,0	—
12,5	—	18,5	19,8	20,9	22,1	23,4	24,6	26,1	27,6	29,0	30,7	32,6
13,2	—	—	—	—	23,4	—	26,0	—	29,2	—	32,5	—
14,0	—	—	—	—	24,8	26,2	27,6	29,3	31,0	32,5	34,5	36,6
15,0	—	—	—	—	—	—	29,6	—	33,2	—	37,0	—

Примечания: 1. Провод марки ПБ может быть получен с изоляцией на 1,68(1,83) и 1,92(2,07) мм.

2. Провод марки ПБУ выпускается с размерами сечения меньшим от 1,8 до стороны $2\delta=2,00(2,10)$, $2,48(2,63)$, $2,96(3,11)$, $3,60(3,80)$, $4,08(4,28)$ и $4,4(4,65)$ мм.

3. Вне скобок указана номинальная толщина изоляции. Размеры катушек

4. Провод марок ПСД и ПСДК выпускается с размерами сечения, помещен для провода с большим размером от 3,75 до 5,60 мм $2\delta=0,39\pm 0,42$ мм (в расчете расчете принимать 0,50 мм).

обмоточного медного провода марки ПБ.

сечения — в мм²

2,80	3,00	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60	$\frac{a}{b}$
10,7													3,75
11,4													4,00
12,1	13,0	13,6											4,25
12,8	—	14,4											4,50
13,5	14,5	15,2	16,2	17,2									4,75
14,3	—	16,2	—	18,3									5,00
15,1	16,3	17,1	18,2	19,3	20,1	21,5							5,30
16,3	—	18,4	—	20,8	—	23,1							5,60
17,1	18,4	19,3	20,6	21,8	22,8	24,3	25,9	27,5					6,00
18,2	—	20,6	—	23,2	—	25,9	—	29,3					6,30
19,3	20,8	21,8	23,2	24,7	25,8	27,5	29,3	31,1	32,9	34,6			6,70
20,5	—	23,1	—	26,1	—	29,1	—	32,9	—	36,6			7,10
21,9	23,5	24,7	26,3	27,9	29,1	31,1	33,1	35,1	37,1	39,2	41,5	43,9	7,50
23,3	—	26,2	—	29,6	—	33,1	—	37,4	—	41,6	—	46,7	8,00
24,7	26,5	27,8	29,6	31,4	32,9	35,1	37,4	39,6	41,9	44,1	46,8	49,5	8,50
26,1	—	29,4	—	33,2	—	37,1	—	41,9	—	46,6	—	52,3	9,00
27,5	29,5	31,0	33,0	35,0	36,6	39,1	41,6	44,1	46,6	49,1	52,1	55,1	9,50
29,1	—	32,8	—	37,1	—	41,5	—	46,8	—	52,1	—	58,5	10,0
30,8	33,1	34,7	37,0	39,2	41,4	43,9	46,7	49,5	52,3	55,1	58,5	61,9	10,6
32,5	—	36,6	—	41,3	—	46,3	—	52,2	—	58,1	—	65,2	11,2
—	37,0	38,8	41,3	43,8	46,0	49,1	52,3	55,4	58,5	61,6	65,4	69,1	11,8
36,4	—	41,0	—	46,3	—	51,9	—	58,5	—	65,1	—	73,1	12,5
38,7	41,5	43,6	46,4	49,2	52,0	55,1	58,6	62,1	65,6	69,1	73,3	77,5	13,2
41,5	—	46,7	—	52,7	—	59,1	—	66,6	—	74,1	—	83,1	14,0
													15,0

две стороны $2\delta=0,45(0,50)$, $0,55(0,62)$, $0,72(0,82)$, $0,96(1,06)$, $1,20(1,35)$, $1,35(1,50)$,

5,6 мм и большим от 6,7 до 19,5 мм. Этот провод может иметь изоляцию на две

считать по толщине изоляции, указанной в скобках.

ными в таблице выше жирной черты. Номинальная удвоенная толщина изоляции

принимать 0,45 мм); с большим размером от 6,00 до 12,5 мм $2\delta=0,44\div0,48$ мм (в

Номинальные размеры и сечения прямоугольного обмоточного (медный провод этих размеров

до 1.1.

Размеры a и b — в мм,

b	a										
	1,85	1,45	1,56	1,68	1,81	1,95	2,1	2,26	2,44	2,63	2,83
3,8	4,92	5,30	5,72	6,17	6,67	7,20	7,50	8,11	8,79	9,51	10,3
4,1	5,33	5,74	6,19	6,68	7,21	7,79	8,13	8,79	9,52	10,3	11,1
4,4	5,73	6,17	6,65	7,18	7,75	8,37	8,76	9,46	10,2	11,1	12,0
4,7	6,14	6,61	7,12	7,79	8,3	8,96	9,39	10,1	11,0	11,9	12,8
5,1	6,68	7,19	7,75	8,36	9,02	9,74	10,2	11,0	11,9	12,9	13,9
5,5	7,22	7,77	8,37	9,03	9,75	10,5	11,1	11,9	12,9	14,0	15,1
5,9	7,76	8,35	8,99	9,7	10,5	11,3	11,9	12,8	13,9	15,0	16,2
6,4	8,43	9,07	9,77	10,6	11,4	12,3	12,9	14,0	15,1	16,3	17,6
6,9	9,11	9,79	10,6	11,4	12,3	13,3	14,0	15,1	16,3	17,7	19,0
7,4	9,78	10,5	11,3	12,6	13,3	14,2	15,0	16,2	17,6	19,0	20,4
8,0	10,6	—	12,3	—	14,4*	15,4*	16,3	17,6	18,9	20,5*	22,1
8,6	11,4	12,3	13,2	14,2	15,5	16,6	17,6	18,9	20,5	22,1	23,8
9,3	12,4	13,3	14,3	15,4	16,6	17,9	19,0	20,5	22,2	24,0*	25,8
10,0			15,4	16,6	17,9*	19,3*	20,5*	22,1*	23,9	25,8*	27,8
10,8					19,3	20,9	22,2	23,9	25,9	27,9	30,1
11,6							23,9	25,7	27,8	30,0	32,3
12,5							25,8	27,8	30,0	32,4*	34,9
13,5									32,4	35,0	37,7
14,5									34,9	37,6	40,5
15,6											43,7
16,8											47,0
18,0											

Примечания: 1. Сортамент алюминиевого провода — меньший размер левой жирной черты).

2. Сортамент медного провода — меньший размер сечения от 1,35 до 5,5 мм, за исключением размеров, отмеченных знаком*.

3. Провод марки АПБ (и ПБ) может быть получен с изоляцией на две сто 1,92(2,07) мм.

4. Провод марки АПБУ выпускается с размерами сечения меньшим от 1,81 стороны 2,00(2,10), 2,48(2,63), 2,96(3,11), 3,60(3,80), 4,08(4,28) и 4,4(4,65) мм.

5. Вне скобок указана номинальная толщина изоляции. Размеры катушек

6. Провод марок АСПД и АПСДК выпускается с большим размером сечения мером от 4,1 до 5,5 мм от 0,39 до 0,42 мм (0,45 мм); с большим размером от 5,9

Таблица 5-3

алюминиевого провода марки АПБ и медного провода марки ПБ
разрешен к изготовлению
1976 г.)
сечения — в мм²

3,05	3,28	3,53	3,8	4,1	4,4	4,7	5,1	5,5	6,0	6,5	7,0	б
11,1	12,0											3,8
12,0	13,0	14,0	15,1									4,1
12,9	13,9	15,0	16,2	17,1								4,4
13,8	14,9	16,1	17,4	18,4								4,7
15,1	16,2	17,5	18,9	20,0	21,5							5,1
16,3	17,5	18,9	20,4	21,7	23,3	25,0	27,2					5,5
17,5	18,9	20,3	21,9	23,3	25,1	26,8	29,2					5,9
19,0	20,5	22,1	23,8	25,3	27,3	29,2	31,7	34,3	37,5			6,4
20,6	22,1	23,9	25,7	27,4	29,5	31,5	34,3	37,1	40,5			6,9
22,1	23,6	25,6	27,6	29,4	31,7	33,9	36,8	39,8	43,5	47,2	50,9	7,4
23,9	25,7	27,7*	29,9	31,9*	34,3	36,7	39,9	43,1*	47,1	51,1	55,1	8,0
25,7	27,7	29,9	32,2	34,4	36,9	39,5	43,0	46,4	50,7	55,0	59,3	8,6
27,9	30,0	32,8	34,8	37,2	40,0*	42,8	46,5	50,3	54,9	59,6	64,2	9,3
30,0	32,3	34,8*	37,5	40,1	43,1*	46,1*	50,1*	54,1*	59,1	64,1	69,1	10,0
32,4	34,9	37,6	40,5	43,4	46,6	49,9	54,2	58,5	63,9	69,3	74,7	10,8
34,9	37,5	40,5	43,6	46,7	50,1	53,6	58,3	62,9	68,7	75,5	80,4	11,6
37,6	40,5	43,6*	47,0	50,4	54,1	57,9*	62,9	67,9*	74,1	80,4	86,6	12,5
40,7	43,8	47,2	50,8	54,4	58,5	62,6	68,0	73,4	80,1	86,9	93,6	13,5
43,7	47,1	50,6	54,6	58,6	62,9	67,3	74,1	78,9	86,1	93,4	100,6	14,5
47,1	50,7	54,6	58,8	63,1	67,6	72,4	78,7	84,9	92,7	100,5	108,3	15,6
50,7	54,6	58,8	63,3	68,0	73,0	78,1	84,8	91,5	99,9	108,3	116,7	16,8
54,4	58,5	63,0	67,9	72,9	78,3	83,7	90,9	98,1	107,1	116,1	125,1	18,0

сечения от 1,81 до 7,0 мм, больший — от 4,1 до 18,0 (вниз от верхней и вправо от
больший — от 3,8 до 14,5 мм (вверх от нижней и влево от правой жирной черты)
роны 2б=0,45(0,50), 0,55(0,62), 0,72(0,82), 0,96(1,06), 1,20(1,35), 1,35(1,50), 1,68(1,83) и
до 5,5 мм и большим от 6,9 до 22 мм. Этот провод может иметь изоляцию на две

считать по толщине изоляции, указанной в скобках.
до 12,5 мм включительно. Изоляция на две стороны для провода с большим раз-
до 12,5 мм от 0,44 до 0,48 мм (0,50 мм).

углеродный алюминиевый провод марок АПСД и АПСДК. Номинальная удвоенная толщина изоляции провода марки ПДА от 0,35 до 0,40 мм.

Медные и алюминиевые провода имеют различную цену. Так, если среднюю цену 1 кг медного провода марки ПБ с изоляцией наименьшей толщины принять за 100%, то цена 1 кг алюминиевого провода марки АПБ с такой же изоляцией составит в среднем 85—88%, медного провода марки ПСД 115—120% и алюминиевого провода марки АПСД 130—150%.

Электрическая прочность изоляции обмоточного провода, являющейся в большинстве обмоток трансформаторов витковой изоляцией, в значительной мере определяет надежность продольной изоляции обмоток. Для обеспечения достаточной прочности изоляции провода существенное значение имеет отделка поверхности проволоки, из которой изготовлен провод — отсутствие на ней неровностей и заусенцев, а также равномерное наложение лент кабельной бумаги. Плотное наложение бумажной изоляции провода гарантирует получение реальных размеров обмоток, близких к расчетным. В расчетные формулы при расчете трансформатора обычно входит масса металла провода обмотки без изоляции, но количество провода при заказе и стоимость провода должны рассчитываться с учетом изоляции. Для опреде-

Таблица 5-4

Ориентировочное увеличение в процентах массы медного провода марки ПБ и алюминиевого марки АПБ (см. примечание) за счет изоляции

Диаметр провода, мм	При толщине изоляции 2δ, мм				
	0,72	1,20	1,92	4,08	5,76
1,0	22	42	—	—	—
1,16	18	35	—	—	—
1,45	13	25	—	—	—
1,68	11	21	—	—	—
1,81	10	19	—	—	—
1,95	9,5	18	—	—	—
2,26	8	15	25	80	128
2,63	7	12	20	64	102
3,05	6	10	17	52	81
3,53	5	9	14	42	66

Примечание. Для алюминиевого провода марки АПБ данные таблицы умножить на 3,3.

Ориентировочное увеличение массы прямоугольного медного провода за счет изоляции для марки ПБ и алюминиевого марки АПБ (см. примечание 3) при номинальной толщине изоляции на две стороны $2\delta = 0,45$ мм

$a, \text{ мм}$ $b, \text{ мм}$	1,40—1,80 (1,35—1,81)	1,90—2,65 (1,95—2,63)	2,80—3,75 (2,83—3,80)	4,00—7,00 (4,10—7,00)
3,75—7,50 (3,8—7,4)	3,5%	3,0%	2,5%	2,0%
8,0—18,0 (8,0—18,0)	2,5%	2,0%	2,0%	1,5%

Примечания: 1. При другой толщине изоляции данные из таблицы умножать при $2\delta = 0,96$ мм на 2,5; при $2\delta = 1,35$ мм на 3,5; при $2\delta = 1,92$ мм на 5,0.

2. Для провода марок ПСД и ПСДК данные из таблицы умножать при $2\delta = 0,40$ мм на 1,7; при $2\delta = 0,45$ мм на 2,0.

3. Для алюминиевого провода данные, полученные из таблицы или с учетом примечаний 1 и 2, умножать на $\gamma_{\text{м}}/\gamma_{\text{А}} = 3,3$.

ления массы изолированного провода обычно увеличивают массу металла обмотки в соответствии с данными табл. 5-1, 5-4 и 5-5. Это увеличение массы зависит от толщины изоляции провода, материала изоляции и плотности металла обмотки.

В современных трансформаторах больших мощностей от 160 000 до 630 000 кВ·А номинальный ток, даже в обмотках высшего напряжения 110 и 220 кВ, достигает 1000—3000 А и сечение витка таких обмоток, а тем более обмоток низшего напряжения этих и трансформаторов меньших мощностей, составляет из сечений многих параллельных медных проводов. Поскольку изоляция между параллельными проводами одного витка требуется минимальная, а изоляция между соседними витками может быть обеспечена общей изоляцией всех проводов витка, возникла идея создания комбинированного провода, состоящего из нескольких параллельных медных проводников, имеющих тонкую эмалевую изоляцию на каждом проводе и общую изоляцию из кабельной бумаги на всех параллельных проводах (рис. 5-5).

В целях выравнивания полных сопротивлений параллельных проводников и равномерного распределения тока между ними эти проводники неоднократно транспонируются по длине провода, т. е. меняются местами, например по схеме, показанной на рис. 5-5, б для семи проводников. Расстояние между двумя транспозициями (на рис. 5-5, б между двумя соседними расположениями проводников) по длине провода составляет для проводов различного сечения от 40 до 250 мм. Провода такого типа называются транспонированными.

Провода, заказ на которые не требует предварительного согласования с поставщиком, имеют следующие данные. Число проводников в таком проводе должно быть нечетным и составляет обычно от 5 до 23 проводников. Провод медный прямоугольного сечения эмалированный высокопрочный марки ПЭМП. Размеры проводни-

ков — меньшая сторона от 1,95 до 3,53 мм; большая сторона от 4,4 до 8,0 мм*. Между двумя рядами проводников прокладывается полоса кабельной бумаги толщиной 0,24 мм (2×0,12 мм). Общая изоляция провода состоит из кабельной бумаги (ГОСТ 645-67) марок К, КМ, КВ или КВМ (марка транспонированного провода ПТВ) и ка-

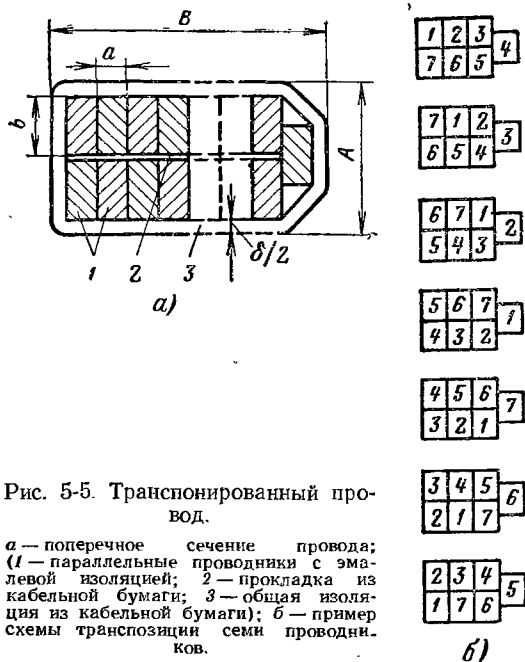


Рис. 5-5. Транспонированный провод.

a — поперечное сечение провода; 1 — параллельные проводники с эмалевой изоляцией; 2 — прокладка из кабельной бумаги; 3 — общая изоляция из кабельной бумаги; b — пример схемы транспозиции семи проводников.

бельной высоковольтной уплотненной бумаги марки КВУ (марка провода ПТВУ).

Число проводников различных размеров и сечений в транспонированном проводе может быть ориентировочно принято по табл. 5-6. Общее сечение провода получается путем суммирования сечений отдельных проводников, взятых из табл. 5-3 или 5-2 при переходе на проводники с размерами сечений, рекомендованными МЭК.

Удвоенная номинальная толщина общей изоляции провода может быть равной: для провода марки ПТВ $2\delta=0,72$ (0,82); 0,96 (1,06); 1,36 (1,51); 1,92 (2,07); для провода марки ПТВУ $2\delta=2,00$ (2,10); 2,48 (2,63) и 2,96 (3,11). При этом в скобках указана максимальная удвоенная толщина изоляции $2\delta_{\text{макс}}$.

* При переходе на сечения проводников, рекомендованные МЭК (ГОСТ 16512-70), меньшая сторона сечения — от 2,00 до 3,55 мм; большая — от 4,50 до 8,00 мм.

**Число проводников в транспонированных проводах,
заказ на которые не требует предварительного согласования
с поставщиком**

Меньшая сторона сечения проводника без изоляции <i>a</i> , мм	Большая сторона сечения проводника без изоляции <i>b</i> , мм								
	4,4	4,7	5,1	5,5	5,9	6,4	6,9	7,4	8,0
	Число проводников в проводе								
1,95	5—21	5—23	5—25	7—27	7—29	7—31			
2,10	5—19	5—21	5—23	5—25	5—27	7—29			
2,26		5—19	5—21	5—23	5—25	5—27	7—29		
2,44			5—19	5—21	5—23	5—25	5—27	7—29	
2,63				5—19	5—21	5—23	5—25	5—27	
2,83					5—21	—	5—23	5—25	5—27
3,05						5—23	5—21	5—23	5—27
3,28						5—17	5—19		
3,53						5—17			

Примечание. Заказ на провода с числом проводников большим, чем 23, требует предварительного согласования.

Размеры *A* и *B*, мм, провода можно ориентировочно определить по формулам:

$$A = 2b + 2\delta_{\text{эм}} + \delta_{\text{прокл}} + 2\delta_{\text{макс}} + \delta_{\text{техн}}, \quad (5-1)$$

где *b* — размер неизолированного проводника по рис. 5-5, *a*, мм;
 $2\delta_{\text{эм}}$ — удвоенная толщина эмалевой изоляции проводника ($2\delta_{\text{эм}} = 0,2$ мм);
 $\delta_{\text{прокл}}$ — толщина прокладки ($\delta_{\text{прокл}} = 0,24$ мм);
 $2\delta_{\text{макс}}$ — максимальная удвоенная толщина изоляции провода, мм;
 $\delta_{\text{техн}}$ — возможное увеличение размера по технологическим причинам. (Для проводников с размером $b = 4,4 \div 8,0$ мм $\delta_{\text{техн}} = 1,3 \div 2,2$ мм);

$$B = 1,05 \left[(a + 2\delta_{\text{эм}}) \frac{n + 1}{2} + 2\delta_{\text{макс}} \right], \quad (5-2)$$

где *a* — размер неизолированного проводника по рис. 5-5, *a*, мм;
n — число проводников в проводе.

Применение транспонированных проводов позволяет уменьшить объем и массу металла обмоток, упростить процесс намотки обмоток и уменьшить добавочные потери в обмотках.

В последние годы в силовых трансформаторах мощностью от 25 до 630 кВ·А в качестве обмоточного материала находит применение неизолированная алюминиевая фольга. ГОСТ 618-62 предусматривает выпуск рулонной алюминиевой фольги для электрических конденсаторов и для других целей толщиной от 0,005 до 0,200 мм при ширине ленты от 10 до 600 мм. Допуск по толщине ленты составляет от $+0,001$ до $+0,005$ мм и от $-0,001$ до $-0,030$ мм, т. е. до 15% номинальной толщины.

В трансформаторах применяется фольга толщиной от 0,050 до 0,200 мм, шириной от 10 до 600 мм. Изоляция между витками обмотки обеспечивается прокладкой конденсаторной, телефонной или кабельной бумаги. Поскольку эта фольга не предусмотрена как обмоточный материал для трансформаторов, к ней не предъявляется требование определенного удельного электрического сопротивления. Поэтому некоторые партии фольги с повышенным удельным сопротивлением не могут применяться для изготовления обмоток. Также может оказаться необходимой отбраковка ленты, прокатанной с предельным отклонением от номинала до -15% .

Наряду с алюминиевой фольгой для обмоток НН применяются также ленты из алюминия по ГОСТ 13726-68. Толщина ленты от 0,25 до 2,0 мм, ширина от 40 до 1000 мм, предельные отклонения по толщине от -20 до -7% .

Одним из важнейших требований, предъявляемых к обмоточному проводу, является требование определенного удельного электрического сопротивления. Для всех круглых и прямоугольных медных проводов, включенных в табл. 5-1—5-3, согласно стандартам это сопротивление при 20°C для отрезка проволоки длиной 1 м с сечением 1 мм^2 должно быть не более $0,01724\text{ Ом}$. Для алюминиевого прямоугольного провода по табл. 5-3 и для круглого провода с диаметром 1,81 мм и более по табл. 5-1 это сопротивление должно быть не более $0,0280\text{ Ом}$, а для круглого с диаметром от 1,35 до 1,74 мм — не более $0,0283\text{ Ом}$.

В сравнительно редких случаях, например во входных катушках обмоток на 110—500 кВ, может применяться добавочная изоляция витков путем обмотки их лентой из кабельной бумаги или лакоткани.

Между витками, состоящими из нескольких парал-

лельных проводов, в обмотках некоторых типов могут быть сделаны радиальные каналы (рис. 5-6), основное назначение которых состоит в том, чтобы обеспечить свободный доступ масла или воздуха для надлежащего охлаждения всех параллельных проводов витка. Эти каналы обеспечивают также надежную, с большим запасом изоляцию между витками.

В обмотках, состоящих из нескольких слоев круглого или прямоугольного провода, собственная изоляция витков может оказаться недостаточной и возникает необходимость введения добавочной изоляции между слоями тем большей, чем больше суммарное рабочее (а следовательно, и испытательное) напряжение двух соседних слоев. Междуслойная изоляция может осуществляться путем прокладки между слоями витков кабельной или телефонной бумаги, электроизоляционного картона или путем оставления между слоями осевого масляного или воздушного канала, обеспечивающего как достаточную изоляцию, так и свободный доступ к обмот-

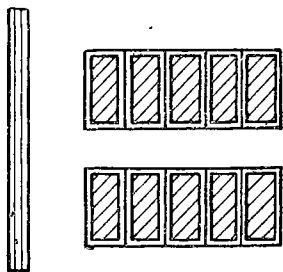


Рис. 5-6. Радиальный охлаждающий канал между двумя витками.

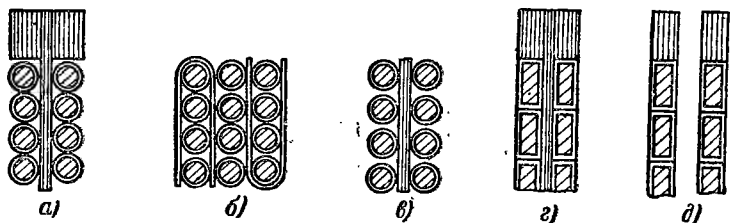


Рис. 5-7. Междуслойная изоляция.

а — кабельная бумага; б — кабельная или телефонная бумага; в и г — электроизоляционный картон; д — масляный канал.

ке охлаждающего масла или воздуха. Различные виды междуслойной изоляции показаны на рис. 5-7.

При разделении обмотки на катушки возникает необходимость в надлежащей междукатушечной изоляции. Эта изоляция для катушек, расположенных в осевом

направлении обмотки, как это видно из рис. 5-8, б — г, требуется то у наружного, то у внутреннего края катушки.

Обычно изоляция между катушками выполняется в виде радиальных или осевых каналов, служащих одновременно для лучшего охлаждения обмотки. В обмотках

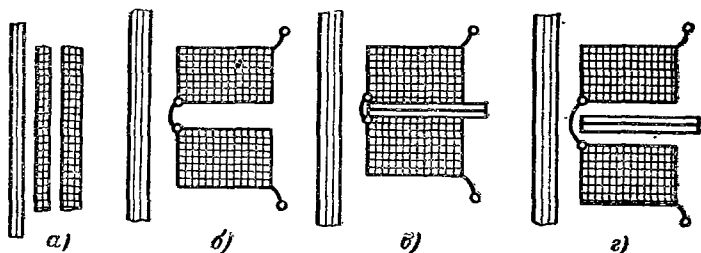


Рис. 5-8. Различные виды междукатушечной изоляции.

а — осевой канал; б — радиальный канал; в — шайбы; г — радиальный канал и шайбы.

трансформаторов класса напряжения 220 кВ и более для улучшения междукатушечной изоляции в радиальных каналах иногда устанавливают барьеры из твердой изоляции в виде шайб из электроизоляционного картона. В трансформаторах с мощностью на один стержень до 110 кВ·А, где вопрос охлаждения обмотки еще не играет существенной роли, оказывается возможным вообще не делать радиальных междукатушечных каналов. В обмотках трансформаторов от 1000 до 6300 кВ·А с потерями короткого замыкания по ГОСТ 12022-66 часто бывает возможно заменить шайбами половину масляных каналов. Такая замена вследствие малой толщины шайб (1 — 2 мм) по сравнению с масляными каналами (4 — 6 мм) позволяет получить некоторую экономию места по высоте (осевому размеру) обмотки (рис. 5-8, в).

Наружный диаметр междукатушечных шайб делается обычно больше наружного диаметра катушки для того, чтобы удлинить путь возможного разряда по поверхности между катушками. Сделать такой же выступ шайбы внутрь обмотки не представляется возможным ввиду того, что при отсутствии внутреннего осевого канала обмотка наматывается непосредственно на цилиндр, а при наличии канала выступ шайбы будет закрывать ка-

нал и тем самым сводить к нулю его охлаждающее действие.

Для того чтобы при малом (1—2 мм) расстоянии между катушками обеспечить достаточную прочность изоляции в междукатушечных промежутках у поверхности цилиндра (внутреннего канала), применяют раз-

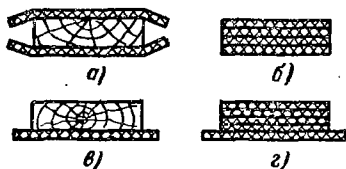
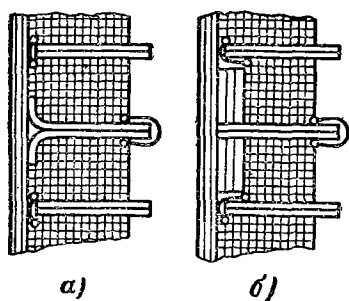


Рис. 5-11. Различные формы поперечного сечения реек.

Рис. 5-9. Междукатушечная изоляция у цилиндра.

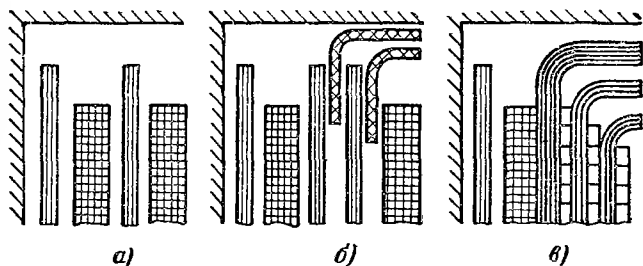


Рис. 5-10. Изоляция между обмотками и обмоток от магнитной системы.

а — изоляция при помощи цилиндров; *б* — комбинация цилиндров и угловых шайб; *г* — отбортованные цилиндры из кабельной бумаги.

личные искусственные методы. К таким методам можно отнести применение угловых шайб с отворотом (рис. 5-9, *а*) или заполнение части объема катушки изоляционным материалом (рис. 5-9, *б*). В том и другом случае искусственно удлиняется путь возможного разряда по поверхности между катушками.

Изоляция между обмотками, а также обмоток от магнитной системы при рабочем напряжении не выше 35 кВ может быть осуществлена путем применения изоляцион-

ных цилиндров (рис. 5-10, а). Высота (осевой размер) цилиндра в этом случае делается больше высоты обмотки, чем удлиняется возможный путь разряда по поверхности между обмотками. В трансформаторах с рабочим напряжением 110 и 220 кВ и более для изоляции обмоток ВН обычно применяется комбинация изоляционных цилиндров с угловыми шайбами (рис. 5-10, б).

Изоляционные цилиндры применяются или жесткие бумажно-бакелитовые, или так называемые мягкие, составленные из намотанных один на другой листов электроизоляционного картона. Угловые шайбы также могут быть жесткими — бумажно-бакелитовыми или прессованными из электроизоляционного картона, или мягкими — свернутыми из полос картона. Для мягких цилиндров и угловых шайб в трансформаторах классов напряжения 110 кВ и более рекомендуется применять мягкий электрокартон с плотностью около 900 кг/м^3 .

Некоторые иностранные фирмы выполняют главную изоляцию обмоток классов напряжения 110 кВ и выше из кабельной бумаги. На внутреннюю обмотку НН наматывается большое число слоев кабельной бумаги с шириной полотна большей, чем высота обмотки НН, и общей толщиной до 4 см и более. Затем наматывается многослойная цилиндрическая обмотка ВН из прямоугольного провода с междуслойной изоляцией также из кабельной бумаги. Осевые масляные каналы делаются только для охлаждения внутренних слоев обмотки. После окончания намотки части цилиндров, образованных слоями кабельной бумаги, выступающие за длину обмотки, отбортовываются вручную, т. е. разрываются по образующим цилиндра на полоски шириной 4—5 см, которые затем отгибаются под углом 90° в радиальном направлении, образуя плоские шайбы, перпендикулярные к оси обмотки (рис. 5-10, в).

Для образования в обмотках и между обмотками и изоляционными цилиндрами осевых каналов чаще всего применяются рейки, склеенные бакелитовым или другим лаком из полос электроизоляционного картона или изготовленные из дерева твердой породы, например белого или красного бука. При намотке рейки укладываются по образующим цилиндра и плотно прижимаются проводом к цилиндру или ранее намотанной катушке. Толщина рейки при этом определяет ширину (радиальный размер) осевого канала (рис. 5-11).

Рейки формы, показанной на рис. 5-11, а и б, применяются для образования осевых каналов в обмотках, не имеющих радиальных каналов. Рейки формы по рис. 5-11, в и г применяются в обмотках с радиальными каналами вместе с прокладками по форме рис. 5-12. Деревян-

ные рейки применяются в обмотках класса напряжения не выше 10 кВ (испытательное напряжение 35 кВ). Полоски электроизоляционного картона, прикрепленные к деревянным рейкам (рис. 5-11,а), служат для защиты изоляции обмотки от повреждений при нажиме ребром рейки.

Радиальные (горизонтальные) каналы между катушками или между витками в обмотках с большим числом

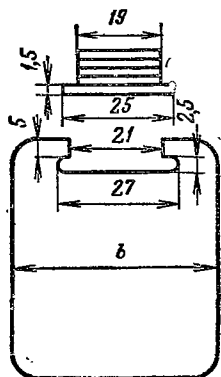


Рис. 5-12. Форма поперечного сечения реек и междукатушечных прокладок.

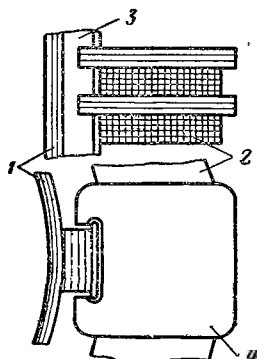


Рис. 5-13. Расположение реек и междукатушечных прокладок.

1 — цилиндр; 2 — катушка; 3 — рейка; 4 — междукатушечная прокладка.

параллельных проводов обычно образуются междукатушечными прокладками, выштампованными из электроизоляционного картона. Каждая междукатушечная или междувитковая прокладка набирается из нескольких пластин толщиной от 0,5 до 3,0 мм до нужной толщины, соответствующей осевому размеру радиального канала. При наличии картона большей толщины можно штамповать прокладки и вырезать рейки из листов картона толщиной, соответствующей ширине канала.

Для того чтобы связать рейки с междукатушечными прокладками, в картонных прокладках проштамповываются просечки по рис. 5-12. Этими просечками междукатушечные прокладки надеваются на крайнюю широкую полосу рейки (рис. 5-13) при намотке на станке или сборке обмотки на стержне.

В обмотках некоторых типов, например в чередующихся, или в обмотках, наматываемых отдельными катушками, применение реек иногда оказывается неудобным. В этом случае применяются так называемые замковые междукатушечные прокладки. Одна из конструкций замковой прокладки изображена на рис. 5-14.

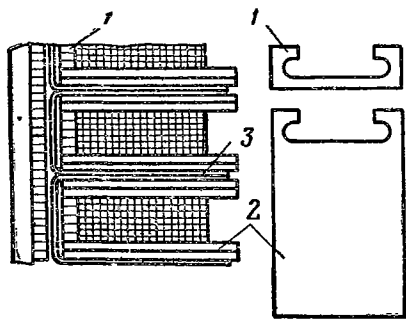


Рис. 5-14. Обмотка с замковыми прокладками без реек.

Осевой канал между обмоткой и цилиндром в этом случае образуется специальными прокладками со сквозной просечкой (деталь 1 на рис. 5-14). Эти прокладки 1 и прокладки, образующие междукатушечные радиальные каналы 2, прошиваются полоской картона 3, отгибаемой в междукатушечный канал. Такие замковые прокладки применяются в обмот-

ках, наматываемых на станке сразу на весь стержень, и в обмотках, наматываемых отдельными дисками и затем собираемых на стержне.

Ввиду того что стандартные толщины листов электроизоляционного картона кратны 0,5 мм, расчетные толщины прокладок (и размеры каналов) должны быть также кратны 0,5 мм. Это соображение относится также к рейкам, склеенным из полосок картона. В целях упрощения намотки обмотки желательно размеры всех горизонтальных каналов выбирать кратными одному из значений стандартной толщины картона (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0 мм). Существенное усложнение в комплектование реек и прокладок перед намоткой обмотки вносит набор прокладок из картона разной толщины (например, канал $5,5 \text{ мм} = 2 \times 2 \text{ мм} + 1,5 \text{ мм}$) или чередование каналов $5 = 2 + 2 + 1 \text{ мм}$ и $6 = 3 + 3 \text{ мм}$.

После насадки обмоток на остов собранные трансформаторы обычно подвергаются сушке под вакуумом при температуре около 100°C . В результате сушки междукатушечные прокладки и шайбы дают усадку, по толщине достигающую 4—6%. При расчете всех типов обмоток, имеющих радиальные каналы или шайбы, сле-

дует учитывать, что действительный суммарный осевой размер междукатушечной (междувитковой) изоляции после сушки и опрессовки обмоток будет меньше расчетного размера на величину усадки.

Число реек по окружности для трансформаторов до 630 кВ·А выбирают обычно исходя из условий удобства намотки, для более мощных трансформаторов — из условий механической прочности. Для ориентировки при выборе числа реек могут служить следующие данные для трансформаторов мощностью:

До 100 кВ·А	6 реек
От 100 до 630 кВ·А	8 реек
От 1000 до 1600 кВ·А	8—12 реек
От 2500 до 10 000 кВ·А	12—16 реек
От 16 000 до 63 000 кВ·А	16—24 реек

В трансформаторах от 10 000 кВ·А и выше число реек должно быть таким, чтобы расстояние между их осями по среднему витку внешней обмотки было равно 15—18 см. Ширина b прокладок обычно принимается равной от 4,0 до 6,0 см, длина (рис. 5-12) определяется радиальным размером обмотки.

Классификация обмоток по типам. Все обмотки трансформаторов по характеру намотки можно подразделить на следующие основные типы: 1) цилиндрические; 2) винтовые; 3) катушечные.

Эти типы обмоток в свою очередь могут подразделяться по ряду второстепенных признаков: числу слоев или ходов, наличию параллельных ветвей, наличию транспозиций и т. д.

5-3. ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ОБМОТКИ ИЗ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПРОВОДА

Простой цилиндрической называется обмотка, сечение витка которой состоит из сечений одного или нескольких параллельных проводов, а витки и все их параллельные провода расположены в один ряд без интервалов на цилиндрической поверхности в ее осевом направлении.

Обмотка, состоящая из двух или большего числа концентрически расположенных простых цилиндрических обмоток (слоев), называется двухслойной или многослойной цилиндрической обмоткой (рис. 5-15).

Любая цилиндрическая обмотка может быть намотана из круглого или прямоугольного провода, однако об-

мотки с числом слоев один — три для силовых трансформаторов в большинстве случаев выполняются из прямоугольного провода. На рис. 5-16 показана однослойная цилиндрическая параллельная обмотка из трех параллельных прямоугольных проводов с числом витков семь и с высотой витка h_v . Ввиду того что намотка витков ведется по винтовой линии, общая высота обмотки l определяется высотой не семи витков, а на один больше.

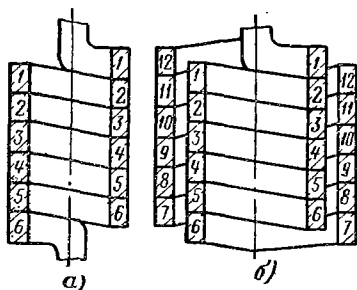


Рис. 5-15. Цилиндрическая обмотка.

а — простая из шести витков;
б — двухслойная из двенадцати витков.

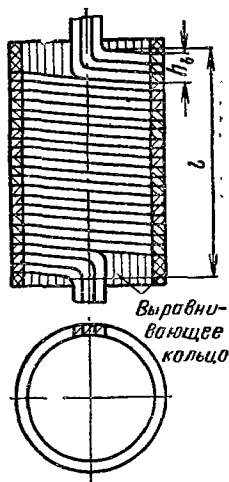


Рис. 5-16. Цилиндрическая обмотка из семи витков.

Это правило справедливо для всех цилиндрических обмоток. Для выравнивания торцовых поверхностей обмотки к верхнему и нижнему виткам каждого слоя прикрепляется разрезное кольцо, вырезанное из бумажно-бакелитового цилиндра (рис. 5-17). Крепление такого кольца к обмотке осуществляется путем подвязки хлопчатобумажной лентой. Концы ленты, охватывающей кольцо, пропускаются между несколькими крайними витками обмотки.

При таком закреплении концов ленты, естественно, несколько увеличивается осевой размер обмотки. Кроме того, приходится считаться с возможностью некоторого увеличения осевого размера вследствие неплотности намотки провода и возможных отклонений действительной толщины изоляции от расчетной. В сумме все возможные отклонения действительного осевого размера для обмоток с осевым размером от 20 до 100 см обычно составля-

ют от 0,5 до 1,5 см. Поэтому при расчете осевого размера такой обмотки расчетную сумму высот проводов принимают на 0,5—1,5 см меньше заданного осевого размера l . В этом случае, когда в процессе намотки обнаруживается, что запас по высоте 0,1—1,5 см оказывается частично или полностью излишним, в обмотку для заполнения высоты параллельно с проводом вматываются полоски электроизоляционного картона. Таким образом делается

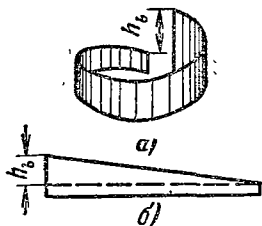


Рис. 5-17. Опорное кольцо обмотки.

a — разрезное кольцо из бумажно-бакелитового цилиндра; b — плоская развертка опорного кольца.

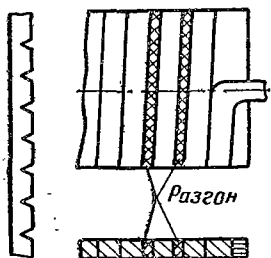


Рис. 5-18. Цилиндрическая обмотка с разгоном по высоте.

«разгон» обмотки так, чтобы общий осевой размер l был непременно выдержан. Полоски картона при этом наматываются на ребро и для удобства намотки снабжаются треугольными просечками (рис. 5-18).

В некоторых случаях, когда сортament прямоугольного провода не позволяет получить плотное заполнение высоты обмотки проводами витков, может быть применен разгон на величину большую, чем 1,5 см.

Намотка провода может производиться плашмя (рис. 5-19, a) или на ребро (рис. 5-19, b). В первом случае больший размер провода b располагается в осевом направлении, во втором — в радиальном. Намотка на ребро несколько труднее намотки плашмя потому, что провод пружинит и стремится повернуться вокруг оси так, как это показано на рис. 5-19, $в$. Кроме того, при намотке на ребро увеличиваются добавочные потери в обмотке. Поэтому рекомендуется избегать намотки на ребро, а в случае применения ее употреблять провод с соотношением сторон поперечного сечения $1,3 \leq b/a < 3,0$.

Цилиндрическая обмотка может быть намотана из нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения. При этом желательно все параллельные провода брать одного сечения. Часто, однако, при жестко задан-

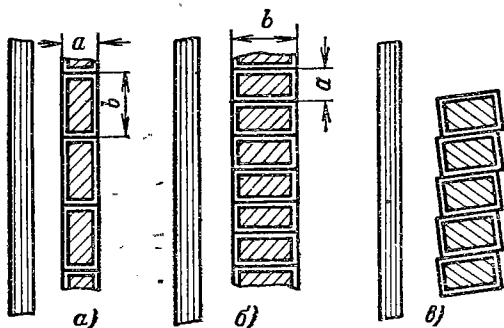


Рис. 5-19. Способы намотки.

a — намотка плашмя; *б* — намотка на ребро; *в* — неправильная намотка на ребро.

ном осевом размере обмотки ввиду ограниченности сортамента обмоточного провода приходится комбинировать сечение витка из разных проводов. Во избежание излиш-

него усложнения заказа провода при этом рекомендуется брать не более двух различных сечений. Кроме того, по соображениям механической прочности размеры обмотки в радиальном направлении обмотки следует выбирать обязательно равными между собой (рис. 5-20).

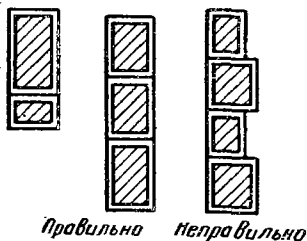


Рис. 5-20. Правильная и неправильная комбинация параллельных проводов.

вается в два слоя. При мощности 10—16 кВ·А иногда удается выполнить обмотку в один слой. Сравнительно редко применяется обмотка в три слоя. Во всех случаях для обеспечения нормального охлаждения каждый слой такой обмотки должен хотя бы с одной стороны омы-

В трехфазных трансформаторах мощностью 25—630 кВ·А цилиндрическая обмотка чаще всего наматывается

ваться маслом. Критерием для определения числа поверхностей слоя, омываемых маслом, служат потери в обмотке, отнесенные к единице площади охлаждаемой поверхности (тепло, отводимое маслом с единицы поверхности) q , Вт/м². Вопрос о числе поверхностей слоя (одна или две), охлаждаемых маслом, решается в зависимости от материала обмотки (медь или алюминий), плотности тока в обмотке и радиального размера провода согласно с указаниями § 5-7.

При выполнении обмотки в два слоя витки обоих слоев соединяются, как правило, последовательно. Возможно также параллельное соединение двух слоев при обязательной транспозиции витков между слоями для выравнивания их активных и реактивных сопротивлений, что требует обрезки и пайки проводов одного из двух слоев в месте перехода из слоя в слой и поэтому используется редко.

При последовательном соединении слоев общее число витков обмотки может быть как четным, так и нечетным. В обоих случаях число витков каждого слоя делается равным половине числа витков всей обмотки. При общем нечетном числе витков число витков каждого слоя получается дробным, кратным половине витка. В этом случае переход из одного слоя в другой располагается со сдвигом в 180° по окружности обмотки по отношению к расположению начала и конца обмотки. Полное число витков обмотки одного стержня всегда должно быть целым числом.

В двухслойной обмотке с последовательным соединением слоев напряжение между двумя крайними витками двух слоев, т. е. между началом и концом обмотки, равняется полному напряжению обмотки одного стержня. Изоляция между такими витками, а значит, и изоляция между слоями обмотки, должна быть рассчитана по полному напряжению обмотки одного стержня. При рабочих напряжениях до 1 кВ эта изоляция легко осуществляется масляным каналом шириной 0,4—0,8 см или цилиндрической прокладкой между слоями из электроизоляционного картона. При рабочих напряжениях обмотки 3 и 6 кВ необходим масляный канал с барьером из двух слоев электроизоляционного картона общей толщиной 0,2 см. Масляный канал между слоями образуется при помощи реек (рис. 5-11, а или б). При напряжениях более высоких, чем 6 кВ, вследствие усложнения междуслойной

изоляции двухслойная цилиндрическая обмотка в трансформаторах мощностью 25—630 кВ·А обычно не применяется.

Механическая стойкость цилиндрической обмотки, представляющей в сечении каждого слоя, как это видно из рис. 5-16, высокую колонку с относительно малым поперечным размером и относительно неплотной намоткой, при осевых силах, возникающих при коротких замыканиях, невелика. Вследствие этого применение одно- и двухслойных цилиндрических обмоток ограничивается обычно трансформаторами с мощностью не более 630 кВ·А. Также по соображениям механической прочности ограничивается и применение большого числа параллельных проводов. С увеличением числа параллельных проводов увеличиваются высота витка, измеренная в осевом направлении, а вместе с тем и угол наклона провода к плоскости поперечного сечения обмотки, что при значительных осевых силах, возникающих при коротких замыканиях, может привести к «сползанию» витков. Обычно по этим соображениям не рекомендуется брать число параллельных проводов более четырех — шести при намотке плашмя и шести — восьми при намотке на ребро.

Предельный ток в обмотке одного стержня, на который может быть рассчитана такая обмотка при максимально возможном числе параллельных проводов, ограничивается сечением применяемого прямоугольного провода и обычно принимаемой плотностью тока $\Delta = 2,3 \div 4,5$ А/мм² — для медных и $\Delta = 1,5 \div 2,5$ А/мм² — для алюминиевых обмоток. Такие обмотки применяются для токов в обмотке одного стержня не свыше 800 А из медного провода и не свыше 600—650 А из алюминиевого провода.

В производстве при намотке на обмоточном станке цилиндрическая обмотка является самой простой и дешевой из всех применяемых типов обмоток.

Цилиндрическая обмотка из прямоугольного провода может применяться при сечении витка не менее 5,04 мм², равном минимальному сечению медного прямоугольного провода по сортаменту, что при наименьшей плотности тока в медном проводе соответствует нижнему пределу рабочего тока обмотки 15—18 А и в алюминиевом проводе с минимальным сечением 7,21 мм² 10—13 А.

В соответствии со всеми приведенными выше соображениями одно- и двухслойная цилиндрическая обмотка

из прямоугольного провода с успехом широко применяется как обмотка НН трех- и однофазных масляных силовых трансформаторов с мощностью на один стержень $S' \leq 250$ кВ·А при напряжении обмотки не выше 6 кВ. В тех же пределах обмотка этого типа иногда применяется для обмоток ВН, однако большие удобства в отношении междуслойной изоляции и расположения ответвлений для регулирования напряжения представляет многослойная цилиндрическая обмотка из круглого провода.

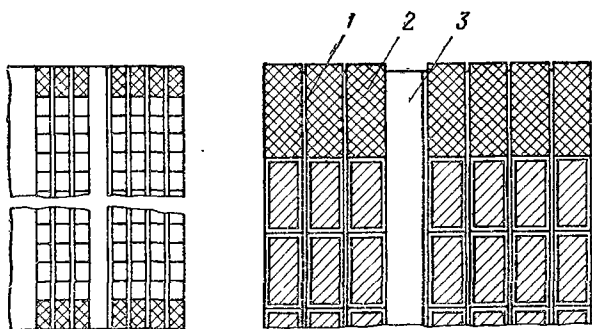


Рис. 5-21. Многослойная цилиндрическая обмотка из прямоугольного провода.

1 — междуслойная изоляция из кабельной бумаги; 2 — бумажно-бакелитовое опорное кольцо; 3 — рейка, образующая охлаждающий канал.

Все более возрастающий выпуск трансформаторов различных типов и необходимость дальнейшего совершенствования их конструкции и технологии производства привели к использованию типов обмоток, ранее не применявшихся в силовых трансформаторах. К числу этих типов относится многослойная цилиндрическая обмотка из прямоугольного провода с последовательным соединением слоев (рис. 5-21). Эта обмотка конструктивно отличается от простой цилиндрической обмотки только числом слоев, и замечания, сделанные ранее относительно числа параллельных проводов и их размещения в слое, относительно опорных колец, разгона витков и другие остаются справедливыми и для каждого слоя многослойной обмотки. В отличие от простой, в многослойной цилиндрической обмотке все параллельные провода должны иметь одинаковые размеры и площадь поперечного

сечения. В этой обмотке также не применяется намотка на ребро, поскольку добавочные потери возрастают пропорционально второй степени числа слоев и пропорционально четвертой степени радиального размера провода.

Направление намотки слоев многослойной обмотки различно. Все нечетные слои, считая изнутри, имеют одно направление намотки, обычно левое, все четные — другое, обычно правое. Напряжение между первым витком какого-либо слоя и последним витком следующего слоя равно сумме рабочих напряжений двух слоев и при рабочем напряжении обмотки 35 кВ может достигать 5000—6000 В. В качестве междуслойной изоляции обычно применяется кабельная бумага, намотанная в несколько слоев. Для предотвращения разряда между соседними слоями ширина полосы кабельной бумаги должна быть больше высоты обмотки на 3,0—5,0 см.

Каждый слой обмотки внизу и вверху должен иметь опорные кольца, вырезанные из бумажно-бакелитового цилиндра. Эти кольца прикрепляются к первым виткам соответствующего слоя обмотки хлопчатобумажной лентой (рис. 5-21). Для получения достаточной поверхности охлаждения в этих обмотках предусматриваются один или два осевых канала между слоями. Ширина каждого канала около 1/100 высоты обмотки. Критерием для выбора числа каналов служит плотность теплового потока (потерь в обмотке) на охлаждаемой поверхности — не более 1400—1500 Вт/м².

Многослойная цилиндрическая обмотка из прямоугольного провода находит применение в качестве обмотки ВН трансформаторов мощностью от 630 до 40 000—80 000 кВ·А классов напряжения 10 и 35 кВ. Ее широкое распространение определяется возможностью обеспечить более плотное заполнение окна магнитной системы, использовать более эффективную теплоотдачу от обмотки к маслу в вертикальных каналах по сравнению с горизонтальными каналами и получить более технологичную конструкцию по сравнению с обмотками других типов. Эта обмотка также имеет более высокую электрическую прочность при воздействии импульсных перенапряжений по сравнению с катушечными обмотками.

Особое значение для многослойных цилиндрических обмоток из прямоугольного провода, предназначенных для трансформаторов мощностью от 630 до 80 000 кВ·А,

имеет обеспечение достаточной механической прочности этих обмоток при коротком замыкании трансформатора. Это достигается плотной намоткой каждого слоя обмотки с механическим осевым поджимом. Рекомендуется после намотки и сушки опрессовать обмотку на прессе с силой, близкой к осевой силе при коротком замыкании. Обмотки, намотанные и обработанные по такой технологии, обычно хорошо выдерживают полное короткое замыкание трансформатора. Некоторые иностранные фирмы применяют также склеивание витков каждого слоя специальной пастой.

Принципиально новой модификацией цилиндрической обмотки являются обмотки, намотанные из неизолированной алюминиевой фольги, находящие применение в трансформаторах мощностью от 25 до 630 кВ·А (рис. 5-22). Лента рулонной фольги имеет шири-

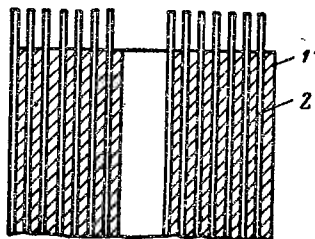


Рис. 5-22. Многослойная цилиндрическая обмотка из алюминиевой фольги.

1 — лента фольги; 2 — между-
слойная изоляция из бумаги.

ну, равную высоте катушки, а для обмоток с рабочим напряжением до 1 кВ — высоту обмотки. Изоляцией между витками служит полоса (или несколько вместе сложенных полос) конденсаторной, телефонной или кабельной бумаги. Ширина полосы бумаги принимается на 6—8 мм больше ширины ленты. Лента фольги вместе с полосой (полосами) бумаги наматывается на цилиндрической оправке с диаметром, равным внутреннему диаметру обмотки. После намотки обмотка снимается с оправки, бумага, выступающая за торцы обмотки на 3—4 мм, пропитывается эпоксидной смолой, запекается и обжимается, образуя монолитный изоляционный слой на торцевых поверхностях обмотки (катушки).

Фольга для намотки обмоток должна иметь удельное электрическое сопротивление не более $0,0280 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ и отклонение от номинальной толщины не более $\pm 3\%$. При использовании фольги по ГОСТ 618-62 фольгу для намотки обмоток следует отбирать по указанным параметрам.

Обмотки из алюминиевой фольги легко наматываются, хорошо выдерживают механические воздействия при

коротком замыкании трансформатора и обладают высокой теплопроводностью в осевом и радиальном направлениях, что приводит к более равномерному распределению температуры по высоте и ширине обмотки и к снижению температуры наиболее нагретой точки по сравнению с обмотками, намотанными из изолированного провода.

При намотке обмотки из алюминиевой фольги на кромке фольги не должно быть заусенцев, которые могут нарушить междувитковую изоляцию. При необходи-

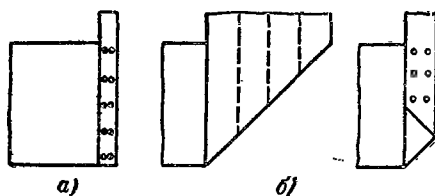


Рис. 5-23. Образование отвода от обмотки из фольги.

а — алюминиевая шина, прикрепленная точечной сваркой; *б* — образование отвода путем отворота ленты фольги.

мости образования осевого охлаждающего канала применяются такие же рейки, как и в обмотке из провода (рис. 5-11, *а*, *б*). Эта обмотка может быть намотана на обычном обмоточном станке или непосредственно на стержне неразрезной магнитной системы, например, показанной на рис. 2-7, *б*. В этом случае на стержень надевается разъемная металлическая гильза, вращаемая от привода специального обмоточного станка. После намотки две половины гильзы вынимаются из обмотки. Возможна также намотка обмотки на изоляционной гильзе из пластмассы, остающейся после намотки как цилиндр, изолирующий внутреннюю обмотку от стержня или наружную обмотку от внутренней.

Основными недостатками обмоток из алюминиевой фольги являются: высокая цена фольги, превышающая цену изолированного алюминиевого провода примерно на 40%; сложность изготовления обмоток ВН классов напряжения 10 и 35 кВ с обязательным разделением этих обмоток на катушки, соединяемые при помощи пайки и трудность крепления отводов к обмоткам из фольги с

толщиной менее 0,1 мм вследствие малой механической прочности этой фольги. Последний (и первый) виток обмотки из фольги толщиной 0,1—0,2 мм может завершаться алюминиевой шиной, прикрепленной к фольге точечной сваркой. При более тонкой фольге возможен, например, способ с отгибом конца ленты по рис. 5-23, б. Сложность изготовления обмотки ВН приводит к тому, что в некоторых случаях предпочитают обмотку НН выполнять из фольги, а обмотку ВН из провода.

5-4. МНОГОСЛОЙНЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ОБМОТКИ ИЗ КРУГЛОГО ПРОВОДА

В трансформаторах мощностью от 25 до 630 кВ·А нашли широкое применение многослойные цилиндрические обмотки из круглого медного или алюминиевого провода в качестве обмоток ВН при напряжениях от 3 до 35 кВ и обмоток НН при напряжениях от 3 до 10 кВ (рис. 5-24).

В многослойной цилиндрической обмотке с последовательным соединением слоев вследствие значительного числа витков в слое между соседними витками, лежащими в разных слоях, могут возникнуть значительные напряжения. Так, между первым витком какого-либо слоя и рядом лежащим последним витком последующего слоя при нормальной работе трансформатора возникает рабочее, а при испытании индуктированным напряжением — испытательное напряжение двух слоев обмотки. В трансформаторах мощностью до 630 кВ·А при классе напряжения от 3 до 35 кВ суммарное рабочее напряжение двух слоев может достигнуть 5000—6000 В, а испытательное 10 000—12 000 В. Собственная изоляция провода в этих условиях оказывается недостаточной, и для обеспечения электрической прочности обмотки приходится применять дополнительную изоляцию между слоями. В качестве такой междуслойной изоляции с успехом применяется кабельная бумага, положенная в несколько слоев (рис. 5-25). Применение меньшего числа слоев более толстого

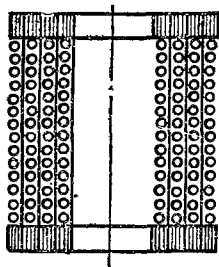


Рис. 5-24. Многослойная цилиндрическая обмотка из круглого провода.

электроизоляционного картона не оправдывает себя, так как картон менее эластичен, чем кабельная бумага, и при намотке сильно натянутого провода при не совсем гладкой поверхности обмотки иногда дает местные изломы, что в дальнейшем приводит к пробоям междуслойной изоляции.

Для предохранения обмотки от разряда между соседними или вообще различными слоями по ее торцевой поверхности

высота междуслойной изоляции делается обычно большей, чем высота слоя обмотки, на 2—5 см (на две стороны), благодаря чему искусственно увеличивается длина пути возможного разряда. Для выравнивания высоты слоя обмотки с высотой междуслойной изоляции и создания твердой опорной поверхности обмотки к каждому слою обмотки прикрепляются так называемые бортики, т. е. свернутые в кольцо полоски электроизоляционного картона толщиной, равной толщине слоя. При намотке обмотки эти бортики предварительно приклеиваются к более широким

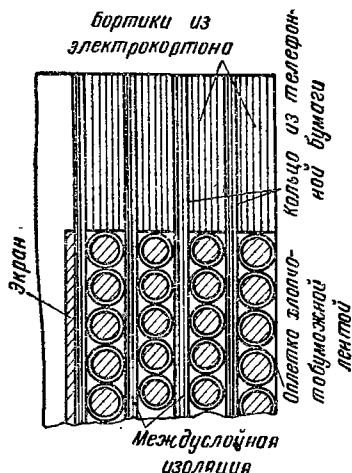


Рис. 5-25. Изоляция в торцевой части многослойной цилиндрической обмотки из круглого провода.

(4,0—5,0 см) полоскам телефонной бумаги (толщиной 0,05 мм), а затем эти полоски укладываются на междуслойную изоляцию и прижимаются крайними витками следующего слоя.

Витки, лежащие во внутренних слоях многослойной цилиндрической обмотки, не имеют непосредственного соприкосновения с охлаждающей средой — маслом или воздухом. Тепло, выделяющееся в этих витках, должно проходить в радиальном направлении через толщу слоев проводов и междуслойной изоляции, отделяющих эти слои от охлаждающего канала. При прохождении теплового потока через толщу обмотки возникает внутренний перепад температуры, тем больший, чем больше число

слоев обмотки и толщина междуслойной изоляции, и достигающий в отдельных случаях 20—25° С.

Для уменьшения этого перепада температуры стараются увеличить общую поверхность охлаждения и уменьшить радиальный размер обмотки. Этого можно достигнуть, разделив всю обмотку на две катушки с осевым каналом между ними. В обмотках НН, располагаемых между стержнем и обмоткой ВН, такой охлаждающий канал делит обмотку на две катушки с одинаковым числом

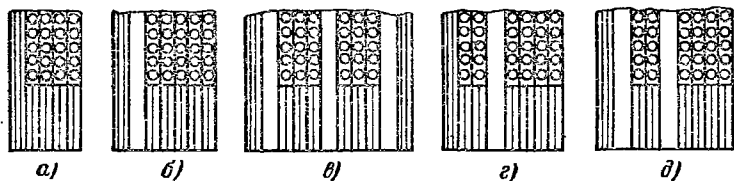


Рис. 5-26. Различные варианты выполнения многослойной цилиндрической обмотки.

а — обмотка ВН на цилиндре; *б* — обмотка ВН на рейках; *в* — обмотка НН; *г* — обмотка ВН на цилиндре с каналом; *д* — обмотка ВН на рейках с каналом.

слоев. В обмотках ВН, у которых внешняя поверхность свободно обтекается маслом и охлаждается лучше, чем внутренние поверхности, число слоев внутренней катушки составляет от 1/3 до 2/5 общего числа слоев. Расположение обмотки на цилиндре для различных вариантов может быть выполнено по рис. 5-26.

Уменьшению внутреннего перепада температуры способствует также пропитка обмотки лаком. Главной целью пропитки является склеивание витков обмотки между собой и с междуслойной изоляцией, чем создается повышение механической прочности обмотки при коротких замыканиях трансформатора. Электрическая прочность внутренней изоляции обмотки от пропитки лаком не повышается, а в рассматриваемых многослойных цилиндрических обмотках, пропитываемых обычно простым погружением в лак с выдержкой в лаке без вакуумирования, даже несколько понижается. Понижение электрической прочности внутренней изоляции обмотки в этом случае объясняется пузырьками воздуха, остающимися главным образом между листами междуслойной изоляции. Для

более полного удаления воздуха из обмотки рекомендуется производить пропитку лаком под вакуумом.

Многослойная цилиндрическая обмотка может быть намотана одним круглым проводом, а также двумя, редко тремя параллельными круглыми проводами. Ввиду того что все параллельные провода каждого витка располагаются у такой обмотки в одном и том же слое и, следовательно, сцеплены практически с одной и той же частью потока рассеяния, обмотка этого типа при последовательном соединении слоев не требует транспозиции параллельных проводов.

Пределы применения обмотки этого типа по току определяются сортаментом круглого медного обмоточного провода от наименьшего сечения $0,1134 \text{ мм}^2$ при диаметре $0,38 \text{ мм}$ до двух параллельных проводов наибольшего диаметра $5,20 \text{ мм}$ и сечения $2 \times 21,22 = 42,44 \text{ мм}^2$. Это соответствует максимально возможному току обмотки одного стержня до $40\text{—}50 \text{ А}$ при одном проводе и до $80\text{—}100 \text{ А}$ при двух параллельных проводах в медных обмотках.

Круглый алюминиевый провод применяется с диаметрами от $1,35$ до $8,0 \text{ мм}$ и сечениями от $1,43$ до $50,24 \text{ мм}^2$, что соответствует максимально возможному току обмотки $125\text{—}135 \text{ А}$, поскольку обмотки из провода с диаметром $6,0\text{—}8,0 \text{ мм}$ наматываются только в один провод.

Так же как и в других цилиндрических обмотках, высота каждого слоя (осевой размер обмотки) определяется числом витков в слое, увеличенным на единицу.

В случае применения многослойной цилиндрической обмотки в качестве обмотки ВН витки, служащие для регулирования напряжения, располагаются в наружном слое обмотки или при большом числе слоев в двух наружных слоях. Регулировочные ответвления часто делаются путем вывода петли обмоточного провода без обрыва его (рис. 5-27, в). Эти ответвления выводятся к верхней торцовой части обмотки и укладываются под верхний слой витков по образующей или под хлопчатобумажную киперную ленту, которой обмотка обматывается по наружной цилиндрической поверхности для повышения механической прочности (рис. 5-27, а и б). Для изоляции ответвления от слоев обмотки, между которыми оно проходит, обычно применяются полоски электроизоляционного картона толщиной $0,5 \text{ мм}$ и шириной $2\text{—}3 \text{ см}$.

Витки, отключаемые при регулировании напряжения на каждой ступени, должны быть разделены на две равные группы, расположенные в верхней и нижней половинах слоя симметрично относительно середины высоты обмотки. Такое расположение уменьшает осевые силы, действующие на всю обмотку, и силы, действующие на отдельные витки внешнего слоя при коротком замыкании трансформатора. По условиям механической прочности применение многослойной обмотки из круглого провода ограничивается трансформаторами мощностью не более 630 кВ·А.

Междуслойная изоляция рассчитывается по суммарному рабочему напряжению двух слоев обмотки. Обмотки с рабочим напряжением до 11—15 кВ оказываются при этом достаточно прочными и при воздействии на них импульсных перенапряжений. В обмотках с рабочим напряжением 35 кВ для сглаживания неравномерного распределения напряжений при импульсах хорошие результаты дает размещение под внутренним слоем обмотки

металлического немагнитного экрана (рис. 5-25) медного, латунного или алюминиевого листа толщиной 0,4—0,5 мм, свернутого в виде разрезанного цилиндра. Разрез шириной 3—4 см по образующей цилиндра делается во избежание образования из цилиндра короткозамкнутого витка. Высота экрана берется обычно равной высоте обмотки l . Экран изолируется от первого (внутреннего) слоя обмотки междуслойной изоляцией из кабельной бумаги. Такая же изоляция укладывается под экран.

При наличии экрана ввод линейного конца делается к внутреннему слою обмотки и экран электрически соеди-

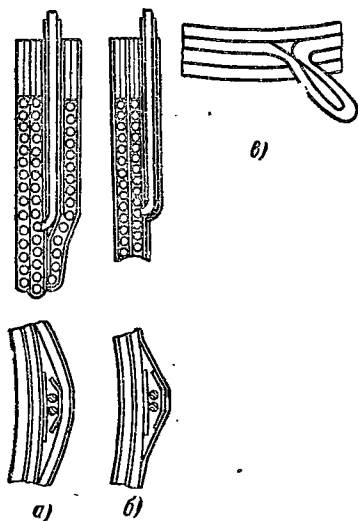


Рис. 5-27. Расположение регулировочных ответвлений в многослойной цилиндрической обмотке.

а — под верхним слоем витков; *б* — под бандажом из киперной ленты; *в* — выполнение ответвления.

няется с началом обмотки. В обмотках с напряжением 35 кВ, имеющих экран, отпадает необходимость усиления изоляции входных витков (или слоев).

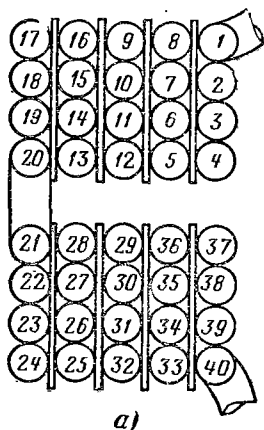
Во избежание пробоя витковой изоляции вследствие подъема напряжения у нейтрали при воздействии на обмотку импульсного перенапряжения усиливается изоляция последних четырех-пяти витков на каждой ступени регулирования напряжения.

В производстве многослойная цилиндрическая обмотка из круглого провода для трансформаторов мощностью до 630 кВ·А является более простой и дешевой по сравнению с применяемой иногда непрерывной катушечной обмоткой, поскольку позволяет вести намотку непрерывным проводом без перекладки витков и без точной укладки их в катушки.

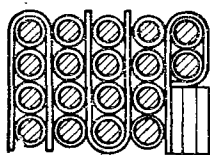
Кроме простоты намотки, этот тип представляет большие удобства в выполнении регулировочных ответвлений. При выполнении изоляционного цилиндра между обмотками ВН и НН в виде «мягкого» цилиндра, намотанного из рольного электроизоляционного картона или из кабельной бумаги, обмотки ВН и НН на один стержень трансформатора могут быть изготовлены в обмоточном цехе в виде готового комплекта, что в значительной мере облегчает установку обмоток на стержень и упрощает сборку трансформатора.

Многослойной цилиндрической катушечной обмоткой называется обмотка, составленная из ряда отдельных, расположенных в осевом направлении катушек, представляющих собой многослойные цилиндрические обмотки.

Многослойная цилиндрическая катушечная обмотка, как правило, выполняется из одного круглого провода без применения парал-



а)



б)

Рис. 5-28. Двойная (а) и одинарная (б) катушки. Междуслойная изоляция картон (а) и кабельная бумага (б).

Многослойная цилиндрическая катушечная обмотка, как правило, выполняется из одного круглого провода без применения парал-

дельных проводов. Для удобства сборки такая обмотка обычно выполняется в виде спаренных катушек, из которых одна наматывается правой, а другая левой намоткой. Применение различного направления намотки в соседних катушках позволяет производить их последовательное соединение, соединяя вместе одноименные, например внутренние, концы. При этом начало и конец каждой такой пары катушек будут находиться на наружной поверхности обмотки. Такие две последовательно соединенные катушки правой и левой намоток, имеющих начало и конец на наружной поверхности, комплектно изготовленные, носят название двойной катушки (рис. 5-28, а). Каждая из двух одинарных простых катушек, входящих в двойную, может отличаться от другой катушки не только направлением намотки, но и числом витков, изоляцией витковой и междуслойной, а в отдельных случаях даже сечением провода. Применение в многослойной цилиндрической катушечной обмотке двойных катушек обуславливает обязательное четное число одинарных катушек на стержне трансформатора.

5-5. ВИНТОВЫЕ ОБМОТКИ

Одноходовой винтовой обмоткой трансформатора называется обмотка, витки которой следуют один за другим в осевом направлении по винтовой линии, а сечение каждого витка образовано сечениями нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения, расположенными в один ряд в радиальном направлении обмотки (рис. 5-29, а). Обычно витки обмотки разделяются радиальными масляными или воздушными охлаждающими каналами. В некоторых обмотках эти каналы могут быть сделаны через два витка. Винтовая одноходовая обмотка может быть намотана и без радиальных каналов с плотным прилеганием витка к витку.

Обмотка, состоящая из двух (или более) одноходовых обмоток, взаимно расположенных подобно ходам резьбы двухходового (многоходового) винта, называется двухходовой (многоходовой) винтовой обмоткой. Сечение витка при этом образуется общим поперечным сечением проводов всех ходов. Эта обмотка также может быть выполнена с радиальными каналами между всеми витками и внутри витков между образующими их ходами, или с каналами только между витками и без каналов внутри витков или совсем без радиальных каналов с плотным прилеганием всех ходов.

Винтовая обмотка выполняется только из прямоугольного провода. При этом все параллельные провода этой обмотки обязательно должны иметь равные не только площади, но и размеры поперечного сечения. При несоблюдении этого правила становится невозмож-

ным уравнение сопротивлений параллельных проводов путем их перекладки в процессе намотки обмотки.

В ряде случаев, когда сечение витка по расчету получается весьма значительным, оно может быть разбито на две группы параллельных проводов и обмотка выполняется в виде двухходовой. В сравнительно редких слу-

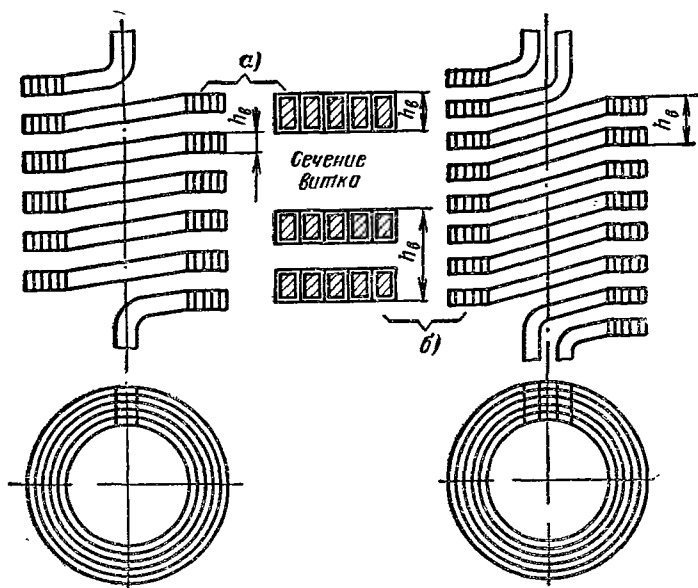


Рис. 5-29. Винтовая параллельная обмотка.

а — одноходовая из шести витков; б — двухходовая из четырех витков.

чаях применяется четырехходовая обмотка. На рис. 5-29, б изображена двухходовая винтовая обмотка.

Обе группы проводов у начала и конца обмотки соединяются параллельно. В большинстве случаев в двухходовых обмотках радиальные каналы делаются как между витками, так и внутри витка между группами проводов (рис. 5-30, б). Иногда для экономии места по высоте обмотки радиальные каналы делаются только между витками и обе группы проводов в каждом витке наматываются вплотную с прокладкой между группами толщиной 0,5—1,00 мм (рис. 5-30, в). Прокладка обеспечивает механическую устойчивость обмотки. Двух- и четы-

реходовая винтовая обмотка может быть также выполнена совсем без радиальных каналов и без прокладок в витках и между витками (рис. 5-30, *г*).

Обычно винтовая обмотка наматывается на жестком бумажно-бакелитовом цилиндре на рейках, расположенных по образующим цилиндра. Для мощных трансформаторов (более 2500 кВ·А на один стержень) обмотка может быть намотана на временном стальном цилиндре,

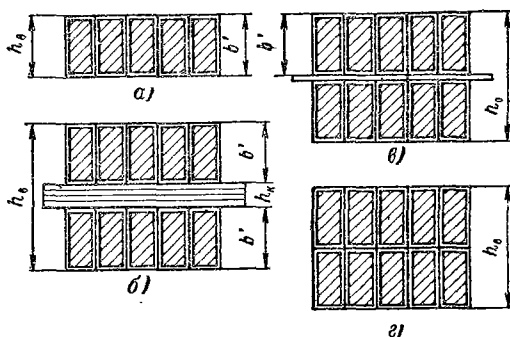


Рис. 5-30. Сечение витка винтовой обмотки.

а — одноходовой; *б* — двухходовой с каналом между двумя группами проводов; *в* — двухходовой без каналов внутри витка; *г* — двухходовой без радиальных каналов.

затем снята с него и при насадке на стержень изолирована от него мягким цилиндром из электроизоляционного картона. Радиальные каналы между витками в обоих случаях образуются междувитковыми прокладками из электроизоляционного картона, нанизываемыми на рейки.

В винтовой обмотке параллельные провода наматываются на цилиндрических поверхностях с разными диаметрами. Вследствие этого активные сопротивления параллельных проводов получаются неравными. В трансформаторах с концентрическим расположением обмоток ВН и НН поле рассеяния направлено в осевом направлении обмоток. В радиальном направлении по ширине каждой из обмоток индукция поля рассеяния возрастает по прямой линии от внешнего края обмотки к каналу между обмотками ВН и НН (рис. 5-31). Различное положение проводов в поле рассеяния обмотки приводит к неравенству реактивных, а следовательно, и полных

сопротивлений параллельных проводов. Для выравнивания полных сопротивлений проводов во избежание неравномерного распределения тока в винтовой обмотке обязательно должна производиться транспозиция (перекладка) проводов.

В одноходовой обмотке обычно применяют комбинацию двух видов транспозиции — групповую, когда все параллельные провода делятся на две или большее число групп и изменяется взаимное расположение этих групп без изменения расположения проводов в группе, и общую, при которой изменяется взаимное расположение всех проводов. В случае применения транспозиции этих видов обмотка делится по длине на четыре равных участка, содержащих по $1/4$ всех витков обмотки. На границах этих участков производится три транспозиции — две групповые на $1/4$ и $3/4$ от общего числа витков, считая от начала обмотки, и одна общая на $2/4$ от общего числа витков. В групповых транспозициях все параллельные провода делятся на две равные группы (при нечетном числе проводов одна из групп имеет на один провод больше другой). В общих транспозициях каждый провод перекладывается самостоятельно. Принципиальная схема транспозиции для одноходовой обмотки из шести параллельных проводов показана на рис. 5-31, а. Такой же способ транспозиции может быть применен и при нечетном числе параллельных проводов, например при пяти проводах (рис. 5-31, б).

Для получения правильной транспозиции, дающей действительное выравнивание сопротивлений проводов, необходимо группировать провода так, чтобы в обеих групповых транспозициях в одни и те же группы соединялись одни и те же проводники, как это показано на рис. 5-31. Чтобы проверить правильность схемы транспозиций, достаточно для каждого проводника просуммировать номера мест, которые он занимает в витке на всех четырех участках обмотки. Так, по рис. 5-31, а для проводника, выделенного жирной линией 1, эта сумма дает $1+4+3+6=14$, по рис. 5-31, б для соответствующего проводника $1+4+2+5=12$. В правильно транспонированной обмотке такие суммы для всех параллельных проводов должны получаться равными между собой. Нетрудно убедиться, что в схемах транспозиции обмоток, изображенных на рис. 5-31, это правило соблюдается.

Необходимо заметить, что такая транспозиция является совершенной только для четырех параллельных проводов. При большем числе проводов эта транспозиция не является полностью совершенной, однако у силовых трансформаторов общего назначения дает почти равномерное распределение тока между параллельными проводами и относительно малые добавочные потери.

Внешний вид общей и групповой транспозиции показан на рис. 5-32, *а* и *б*. Как видно из этих рисунков, каждая такая транспозиция увеличивает осевой размер обмотки на высоту витка и радиального канала. Таким образом, общий осевой размер (высота) обмотки при двух групповых и одной общей транспозициях увеличивается на высоту трех витков и трех каналов. Следует также помнить, что за счет совпадения на одной образующей начала и конца обмотки осевой размер увеличивается еще на высоту одного витка и одного канала.

В двухходовой винтовой обмотке в каждом ее ходу могут быть также сделаны групповые и общие транспозиции. Однако в такой

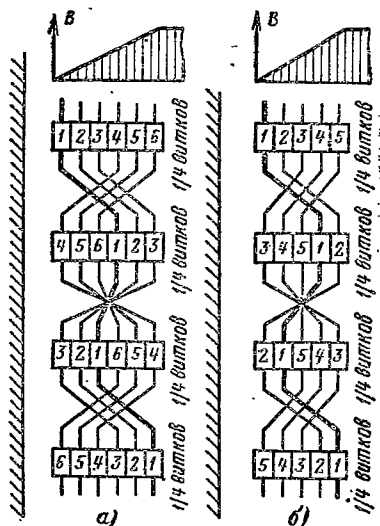


Рис. 5-31. Схема транспозиций параллельных проводов в однофазной обмотке.

а — четное число проводов; *б* — нечетное число проводов.

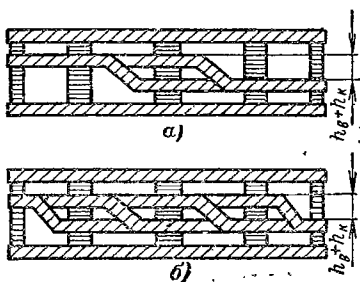


Рис. 5-32. Увеличение высоты однофазной обмотки при транспозиции для обмотки из четырех параллельных проводов.

а — групповая транспозиция; *б* — общая транспозиция.

обмотке можно применить и другой, более совершенный тип транспозиции. Сечение витка такой обмотки, изображенное на рис. 5-33, состоит из

двух групп проводов. Идея транспозиции заключается в постепенном круговом перемещении проводов в сечении витка по мере намотки обмотки так, чтобы каждый провод побывал во всех возможных положениях, проходя в них равные отрезки (выражаемые обычно в числе витков). В отличие от групповой и общей транспозиций, сосредоточенных в трех точках обмотки, такую транспозицию можно назвать равномерно распределенной. Обычно в двухпроводной обмотке число транспозиций делают равным числу параллельных проводов или их удвоенному числу. На рис. 5-33 показана схема равномерно распределенной транспозиции в двухпроводной обмотке из восьми параллельных проводов. Во избежание усложнения чертежа на схеме показано перемещение только двух проводов 1 и 5.

Расстояния между двумя транспозициями при числе параллельных проводов $n_{\text{в}}$ делаются равными $1/n_{\text{в}}$ от общего числа витков обмотки, а крайние участки у начала и конца обмотки вполупину короче, т. е. $1/2 n_{\text{в}}$ от общего числа витков.

По схеме на рис. 5-33 нетрудно убедиться в том, что при таком распределении транспозиций каждый провод по мере прохождения по длине обмотки пройдет каж-

дое из $n_{\text{в}}$ возможных положений в сечении витка на $1/n_{\text{в}}$ от общей длины обмотки.

Практически равномерно распределенная транспози-

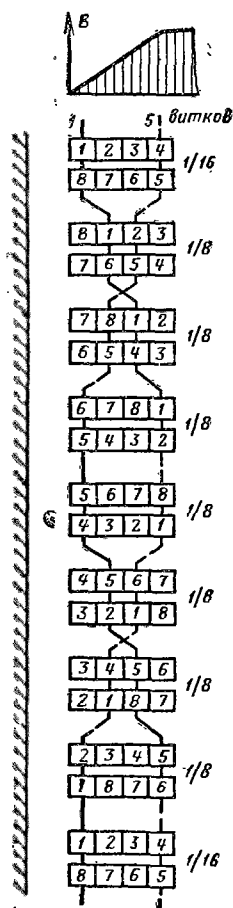


Рис. 5-33. Схема равномерно распределенной транспозиции в двухпроводной обмотке из восьми параллельных проводов.

ция выполняется так, как показано на рис. 5-34. Верхний провод 4 левой группы отгибается вправо и становится верхним проводом правой группы. Одновременно нижний провод 8 правой группы переходит нижним проводом в левую группу. Провода левой группы 1, 2 и 3 поднимаются на одно положение вверх, а провода 5, 6 и 7 правой опускаются на одно положение вниз.

Равномерно распределенная транспозиция в двухходовой обмотке может быть сделана при любом числе

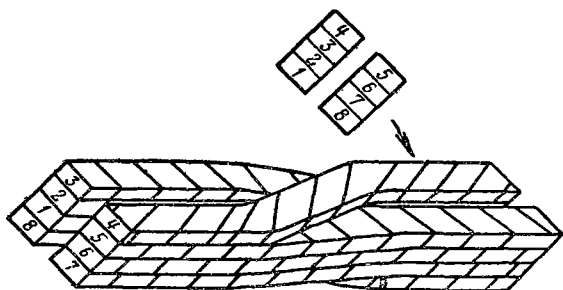


Рис. 5-34. Выполнение равномерно распределенной транспозиции.

параллельных проводов и дает более полное уравнивание их сопротивлений, чем групповые и общие транспозиции. Второе преимущество равномерно распределенной транспозиции заключается в том, что она не требует добавочного места по высоте обмотки. Однако при определении изоляционных расстояний следует учитывать, что в местах транспозиции радиальный размер обмотки увеличивается на одну толщину провода.

Винтовая обмотка с любым числом ходов может быть намотана также из транспонированного провода. При этом отпадает необходимость в дополнительной транспозиции параллельных проводников, помимо той, которая сделана в самом проводе.

Плотность тока в обмотках силовых трансформаторов, выпускаемых в последние годы с относительно малыми потерями короткого замыкания, составляет в медных обмотках около 2,0—2,5 А/мм² и в алюминиевых 1,4—1,8 А/мм². При такой плотности тока потери в единице объема обмотки и плотность теплового потока на осевых и радиальных охлаждаемых поверхностях витков

также невелики и возникает возможность существенного уменьшения числа каналов в обмотке вплоть до полного отказа от горизонтальных каналов.

Винтовая обмотка без горизонтальных каналов с плотным прилеганием витков в осевом направлении может быть одноходовой, двух- и четырехходовой с обычными для таких обмоток транспозициями. Такая обмотка наматывается на цилиндре на рейках типа рис. 5-11, а и б, или на оправке без реек и без прокладок между ходами. Не исключена намотка двухслойной винтовой обмотки, т. е. двух концентрических винтовых обмоток левого и правого направления намотки, соединяемых последовательно.

При использовании винтовой обмотки без горизонтальных каналов следует принимать во внимание то, что плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности обмотки существенно возрастает и ее не рекомендуется допускать более $1400\text{--}1500\text{ Вт/м}^2$. При этом перепад температуры между поверхностью обмотки и маслом в вертикальных каналах примерно на 25% ниже, чем в обмотке с витками, имеющими горизонтальные и вертикальные поверхности. Необходимо также учитывать, что в обмотке без горизонтальных каналов добавочные потери могут быть в 1,5—2,0 раза больше, чем в обмотке с тем же числом витков и с тем же числом, размерами и расположением параллельных проводов, но с горизонтальными каналами.

В механическом отношении при возникновении осевых механических сил винтовая обмотка является значительно более прочной, чем одно- и двухслойная цилиндрическая. Параллельные провода в каждом витке располагаются в ней не в осевом, а в радиальном направлении, образуя относительно большую опорную поверхность. Механическая жесткость обмотки усиливается рейками, идущими по всей длине обмотки и связанными с ними горизонтальными прокладками, плотно зажатými между витками обмотки.

Помимо этого, винтовая обмотка позволяет в значительной мере уменьшить осевые механические силы в трансформаторе путем разгона витков в середине ее высоты в зоне размещения отключаемых регулировочных витков обмотки ВН. Разгон витков применяется в трансформаторах с мощностью $S \geq 1000\text{ кВ}\cdot\text{А}$ и достигается путем увеличения двух-трех радиальных каналов

в середине высоты обмотки НН до 1,5—2,0 см. Достаточную механическую прочность обмотка получает только при некотором минимальном сечении витка, не менее 75—100 мм², что соответствует току около 300 А для медных и 150—200 А для алюминиевых обмоток.

Этот нижний предел допустимого сечения витка и тока обмотки соответствует силовым трансформаторам с мощностью $S=160\div 1000$ кВ·А. При больших мощностях нижним пределом применения винтовой обмотки берут обычно 400—500 А.

По соображениям механической прочности, а также удобства выполнения транспозиций число параллельных проводов берется обычно не менее четырех.

Наличие масляных каналов между соседними витками обеспечивает высокую электрическую прочность винтовой обмотки, и она находит широкое применение как обмотка НН в трансформаторах с напряжением на стороне НН от 230 В до 20 кВ включительно. При следующем стандартном напряжении 35 кВ применение этого типа обмотки ограничено, так как при минимально допустимом номинальном токе около 400 А эта обмотка может найти применение только в трансформаторах с мощностью на один стержень не менее

$$\frac{400 \cdot 35}{\sqrt{3}} = 8000 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

На стороне ВН винтовая обмотка совершенно не нашла применения ввиду неудобства выполнения ответвлений для регулирования напряжения.

В производстве винтовая обмотка существенно дороже многослойной цилиндрической обмотки из прямоугольного провода.

5-6. КАТУШЕЧНЫЕ ОБМОТКИ

Обмотка, состоящая из ряда последовательно соединенных катушек, намотанных в виде плоских спиралей из одного или более проводов прямоугольного сечения и расположенных в осевом направлении обмотки, с радиальными каналами между всеми или частью катушек называется катушечной обмоткой. Если катушечная обмотка наматывается непрерывным проводом или несколькими непрерывными параллельными проводами, она называется непрерывной катушечной обмоткой

(рис. 5-35). Катушечная обмотка, собранная из отдельно намотанных катушек, называется дисковой катушечной обмоткой.

Непрерывная катушечная обмотка не имеет обрывов и паяк провода. Все переходы из одной катушки в другую осуществляются кратчайшим путем по направлению внутренней или внешней образующей обмотки. Такая обмотка может быть намотана также из двух, трех, а иногда и более параллельных проводов. В этом случае во избежание излишнего увеличения радиального размера обмотки в месте перехода из катушки в катушку каждый из параллельных проводов переходит самостоятельно так, как изображено на рис. 5-36. При таком переходе провода меняются местами: наружный провод катуш-

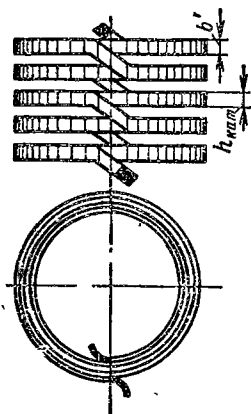


Рис. 5-35. Непрерывная катушечная обмотка.



Рис. 5-36. Переход между катушками с транспозицией трех параллельных проводов.

ки переходит внутрь, внутренний наружу и т. д. При этом одновременно осуществляется и транспозиция проводов, необходимая для уравнивания полных сопротивлений параллельных проводов. Необходимость транспозиции обуславливается тем, что параллельные провода наматываются на окружностях разных диаметров и находятся в различных зонах поля рассеяния.

Вследствие значительного угла изгиба провода на ребро в местах перехода из одной катушки в другую изоляция проводов легко повреждается. Поэтому для обеспечения надлежащей электрической прочности обычно применяют в местах перехода добавочную изоляцию провода в виде оплетки полосками кабельной бумаги или лакоткани или подвязки изоляционных коробочек из электроизоляционного картона.

Непрерывная катушечная обмотка может быть намотана на жестком бумажно-бакелитовом цилиндре, на рейках, расположенных по образующим цилиндра. В случае применения мягких изоляционных цилиндров, из электроизоляционного картона, обмотка наматывается на станке на рейках, расположенных на временной цилиндрической оправке без изоляционного цилиндра. В этом случае цилиндр наматывается при сборке трансформатора перед насадкой соответствующей обмотки. Для образования радиальных междукатушечных каналов применяются прокладки, штампованные из электроизоляционного картона, как показано на рис. 5-12 и 5-13. В случае необходимости междукатушечная изоляция в виде каналов может быть усилена установкой в каналах между катушками шайб из электроизоляционного картона. Для удобства установки шайб при намотке они обычно выполняются разрезными. В каждом канале устанавливаются две шайбы с разрезами, сдвинутыми один относительно другого. Ввиду наличия разрезов при двух шайбах в канале следует при определении электрической прочности вводить в расчет только одну толщину шайбы. Такая изоляция применяется иногда в трансформаторах на 220 кВ и более.

Радиальные каналы в обмотке обычно делают между всеми катушками, однако в трансформаторах с пониженными потерями короткого замыкания и в алюминиевых обмотках (§ 5-2 и 5-7) иногда каналы могут быть сделаны через две катушки. В этом случае половина радиальных каналов между катушками заменяется разрезными шайбами по две шайбы толщиной 0,5 мм взамен каждого канала.

Переход провода из одной катушки в другую в непрерывной катушечной обмотке делается в промежутках между прокладками, образующими радиальные каналы. Число витков в каждой катушке может быть как целым, так и дробным. В последнем случае знаменателем дроби в расчетной записке обычно указывается число междукатушечных прокладок (реек) по окружности обмотки. Так, при 16 прокладках (рейках) в обмотке правильным будет указание намотать в катушке, например, $8\frac{4}{16}$ витка, а не $8\frac{1}{4}$ витка. При намотке такой обмотки на станке наматывают восемь полных витков, а потом отсчитывают четыре промежутка между прокладками и делают переход на следующую катушку.

Максимальный радиальный размер обмотки определяется числом целых витков плюс один виток. В разобранном выше примере максимальный радиальный размер равен $8+1=9$ толщинам провода с изоляцией.

Возможность намотки в катушке дробного числа витков всегда позволяет легко разместить полученное по расчету число витков по катушкам, однако для упрощения намотки обмотки на станке рекомендуется рассчитывать катушки с целым числом витков. В одной обмотке рекомендуется применять не более четырех типов катушек с разным числом витков, а общее число катушек брать четным.

Иногда по условиям сборки или по условиям изоляции обмоток, например в обмотках на 220 кВ и более, непрерывная намотка катушечных обмоток неудобна. В этом случае обмотка изготавливается в виде комплекта двойных катушек (рис. 5-37).

Витки, служащие для регулирования напряжения в обмотках ВН, должны располагаться в отдельных катушках так, чтобы регулировочные ответвления вы-

полнялись на переходах между катушками, а не от средних витков катушки. Также в отдельных катушках должны размещаться входные витки с усиленной изоляцией, которая может быть выполнена в виде усиленной изоляции провода или оплетки всей катушки снаружи лентой из кабельной бумаги или лакоткани. Усиленная изоляция между слоями (витками) в виде прокладок, как правило, не применяется.

Катушки с различным числом витков — основные, регулировочные, с усиленной изоляцией — принято для удобства обозначать различными буквами алфавита.

При размещении витков обмотки в катушки необходимо следить за тем, чтобы радиальные размеры катушек различных типов были приблизительно равными.

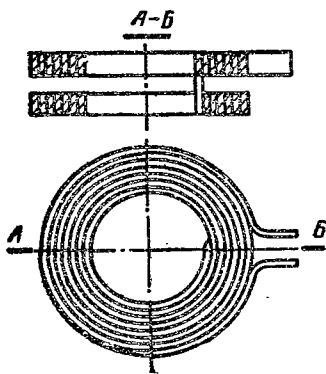


Рис. 5-37. Двойная катушка катушечной обмотки.

Рекомендуется это размещение производить так, чтобы радиальные размеры наиболее широкой и наиболее узкой катушек обмотки стержня, в том числе и регулировочных и с усиленной изоляцией, отличались не более чем на двойную толщину провода. В тех случаях, когда этого нельзя добиться простым перемещением витков, например в регулировочных катушках, допускается выравнивание радиального размера отдельных катушек путем вматывания между их витками полосок электроизоляционного картона.

В механическом отношении непрерывная катушечная обмотка является одной из самых прочных обмоток, применяемых в трансформаторах. С увеличением мощности трансформатора и ростом осевой составляющей механических сил при коротком замыкании растут также радиальный размер катушек обмотки и ее механическая устойчивость. Таким образом, условия механической прочности не ставят практически никаких пределов применению обмотки этого типа, и она может применяться на очень большом диапазоне мощностей трансформаторов, от 160 до 63 000 кВ·А и выше. Обмотка этого типа с успехом применяется также и в широком диапазоне напряжений, от 2—3 до 110, 220 кВ.

При более высоких напряжениях усложняется защита обмотки от импульсных атмосферных перенапряжений, вследствие чего обмотку приходится разделять на части, наматываемые непрерывно, и на части, состоящие из отдельно наматываемых катушек. С этой целью также часть обмотки может быть сделана переплетенной, когда порядок последовательного соединения витков отличается от последовательности их размещения в катушках, например когда в двух соседних катушках соединяются последовательно сначала все нечетные витки, а затем последовательно с ними все четные. Возможны и другие способы получения переплетенной обмотки (см. § 4-5).

Непрерывная катушечная обмотка может быть применена при всех токах нагрузки, когда при выбранной плотности тока и достаточном числе витков сечение проводника получается равным или большим, чем минимальное по сортаменту сечение прямоугольного медного провода 5,04 мм² или алюминиевого провода 7,21 мм². При наименьшей применяемой плотности тока в обмотках это соответствует нижнему пределу рабочего тока

обмотки в медном проводе 15—18 А и в алюминиевом проводе 10—13 А.

В производстве непрерывная катушечная обмотка при равном числе витков и сечении витка несколько сложнее и дороже, чем одно- и двухслойная цилиндрическая из прямоугольного провода или многослойная цилиндрическая из круглого провода. Поэтому в трансформаторах с мощностью на один стержень до 250 кВ·А предпочитают применять цилиндрические обмотки. В трансформаторах большей мощности, где требования механической прочности играют решающую роль, непрерывная катушечная обмотка является наиболее употребительной.

Благодаря высокой механической прочности, легкости распределения витков обмотки по катушкам, удобству выполнения регулировочных ответвлений, сравнительной простоте намотки, отсутствию паек между катушками и простоте насадки на стержень непрерывная катушечная обмотка находит широкое применение в масляных силовых трансформаторах в качестве обмотки ВН для трансформаторов с мощностью от 160 до 63 000 кВ·А и выше при токах нагрузки от 10—15 А и выше. Обмотка этого типа находит применение также в качестве обмоток НН при токах от 10—15 до 300 А. В этом случае для уменьшения осевых механических сил в обмотках трансформаторов мощностью 1000 кВ·А и выше, переключаемых без возбуждения (ПБВ), у которых регулировочная часть обмотки ВН располагается в середине высоты стержня, рекомендуется делать в середине высоты обмотки НН разгон между катушками путем увеличения двух-трех радиальных каналов до 1,5—2 см.

5.7. ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ ОБМОТОК

Выбор типа конструкции обмоток при расчете трансформатора должен производиться с учетом эксплуатационных и производственных требований, предъявляемых к трансформаторам в целом (§ 5-1).

В настоящем параграфе даются общие указания по выбору конструкции обмотки по ее электрическим величинам: току нагрузки одного стержня I_c , мощности трансформатора S и номинальному напряжению $U_{нв}$, а также по поперечному сечению витка обмотки P .

Именно эти данные трансформатора служат основными критериями при выборе типа обмотки.

Ориентировочное сечение витка каждой обмотки может быть определено по формуле

$$П = \frac{I_c}{\Delta_{cp}}, \quad (5-3)$$

где I_c — ток соответствующей обмотки одного стержня;
 Δ_{cp} — средняя плотность тока в обмотках ВН и НН, А/мм².

Выбор средней плотности тока в обмотках не является произвольным. На том этапе расчета, когда выбирается тип обмотки, уже известны основные размеры магнитной системы, э. д. с. одного витка и числа витков в каждой из обмоток, а также ориентировочные основные размеры обмотки (внутренний диаметр и высота). В зависимости от выбора значения Δ_{cp} будут изменяться объем и масса обмоток, а следовательно, и основные потери в них $P_{осн}$. Обычно при расчете трансформатора потери короткого замыкания P_k бывают заданы и выбор средней плотности тока должен быть связан с заданной величиной P_k .

Для определения средней плотности тока в обмотках, А/мм², обеспечивающей получение заданных потерь короткого замыкания, можно воспользоваться формулами, выведенными в § 7-1:

для медных обмоток

$$\Delta_{cp} = 0,746 k_d \frac{P_k u_B}{S d_{12}}; \quad (5-4)$$

для алюминиевых обмоток

$$\Delta_{cp} = 0,463 k_d \frac{P_k u_B}{S d_{12}}. \quad (5-5)$$

Плотность тока в обмотках из транспонированного провода определяется по (5-4) или (5-5), в обмотках из алюминиевой фольги по (5-5).

При расчете трехобмоточного трансформатора в (5-4) и (5-5) следует подставлять потери короткого замыкания P_k для внутренних обмоток при 100%-ной мощности, полную (100%) мощность трансформатора S и диаметр d_{12} для двух внутренних обмоток, определяемый по методике, принятой для двухобмоточных трансформато-

ров. Для обмоток, рассчитываемых на 67% полной мощности трансформатора значение $\Delta_{\text{ср}}$, найденное по (5-4) и (5-5), следует умножить на 0,67.

Для автотрансформаторов под S следует понимать типовую (расчетную) мощность автотрансформатора.

Формулы (5-4) и (5-5) связывают искомую среднюю плотность тока в обмотках ВН и НН с заданными величинами: полной мощностью трансформатора S (кВ·А), потерями короткого замыкания $P_{\text{к}}$ (Вт) и величинами, определяемыми до расчета обмоток: э. д. с. одного витка $u_{\text{в}}$ (В) и средним диаметром канала между обмотками d_{12} (см). Коэффициент $k_{\text{д}}$ учитывает наличие добавочных потерь в обмотках, потери в отводах, в стенках бака и т. д. Значения $k_{\text{д}}$ могут быть взяты из табл. 3-6 (§ 3-5).

Значение $\Delta_{\text{ср}}$, полученное из (5-4) или (5-5), следует сверить с данными табл. 5-7, где приведены ориентировочные значения практически применяемых плотностей токов. Сверка рассчитанного значения $\Delta_{\text{ср}}$ с таблицей имеет целью избежать грубых ошибок в расчете $\Delta_{\text{ср}}$. Точного совпадения $\Delta_{\text{ср}}$ с цифрами таблицы, не требуется. По этой же таблице можно выбрать среднюю плотность тока в обмотках в том случае, когда потери короткого замыкания не заданы.

Найденное по (5-4) или (5-5) значение плотности тока является ориентировочным средним значением для обмоток ВН и НН. Действительная средняя плотность тока в обмотках должна быть выдержана близкой к этой. Плотности тока в каждой из обмоток масляного трансформатора с медными или алюминиевыми обмотками могут отличаться от среднего значения, желательно, однако, чтобы не более чем на 0,1. Следует помнить, что отклонение действительной средней плотности тока от найденной по (5-4) и (5-5) средней плотности в сторону возрастания увеличивает потери короткого замыкания $P_{\text{к}}$ и в сторону уменьшения — снижает.

В сухих трансформаторах вследствие существенного различия условий охлаждения для внутренних и наружных обмоток плотность тока во внутренней обмотке НН обычно снижают на 20—30% по сравнению с наружной обмоткой ВН. Поэтому в таких трансформаторах отклонение действительной плотности тока в обмотках от найденного среднего значения может достигать до $\pm(0,15-0,20)$. По этой же причине среднюю плотность тока

Средняя плотность тока в обмотках Δ , А/мм², для современных трансформаторов с потерями короткого замыкания по ГОСТ

а) Масляные трансформаторы

Мощность, трансформатора S, кВ·А	25—40	63—630	1 000 6 300	10 000— 18 000	25 000—80 000
Медь	1,8—2,2	2,2—2,8	2,3—2,8	2,2—2,6	2,2—2,6
Алюминий	1,2—1,4	1,4—1,8	1,5—1,8	1,2—1,5	—

б) Сухие трансформаторы

Мощность, трансформатора S, кВ·А	10—160; 0,5 кВ		160—1600; 10 кВ	
Обмотка	Внутренняя НН	Наружная ВН	Внутренняя НН	Наружная ВН
Медь	2,0—1,4	2,2—2,8	2,0—1,2	2,1—2,6
Алюминий	1,3—0,9	1,3—1,8	1,2—0,8	1,4—1,7

Примечания: 1. Для трансформаторов с потерями короткого замыкания выше нормы ГОСТ возможен выбор плотности тока в масляных трансформаторах до 4,5 А/мм² в медных и до 2,7 А/мм² в алюминиевых обмотках; в сухих трансформаторах соответственно до 3,0 и 2,0 А/мм².

2. Плотность тока в обмотках из транспонированного провода выбирается так же, как и для медного или алюминиевого провода.

3. Плотность тока в обмотках из алюминиевой фольги выбирается как для алюминиевого провода.

в обмотках этих трансформаторов рекомендуется принимать 0,93—0,97 значения, найденного по (5-4) или (5-5).

После определения средней плотности тока $\Delta_{ср}$ и сечения витка Π для каждой из обмоток можно произвести выбор типа конструкции обмотки, пользуясь указаниями, сделанными в предыдущих параграфах и сведениями вкратце в табл. 5-8. При выборе конструкции обмоток ВН следует учитывать так же и возможность получения наиболее удобной схемы регулирования напряжения обмотки ВН в соответствии с указаниями, данными в § 6-2.

Основные свойства и нормальные пределы применения

Тип обмотки	Применение на стороне		Основные достоинства	Основные недостатки
	Главное	Возможное		
Цилиндрическая одно- и двухслойная из прямоугольного провода	НН	ВН	Простая технология изготовления, хорошее охлаждение	Малая механическая прочность
Цилиндрическая многослойная из прямоугольного провода	ВН	НН	Хорошее заполнение окна магнитной системы, простая технология изготовления	Уменьшение охлаждаемой поверхности по сравнению с обмотками, имеющими радиальные каналы
Цилиндрическая многослойная из круглого провода	ВН	НН	Простая технология изготовления	Ухудшение теплоотдачи и уменьшение механической прочности с ростом мощности
Винтовая одно-, двух- и многоходовая из прямоугольного провода	НН	—	Высокая механическая прочность, надежная изоляция, хорошее охлаждение	Более высокая стоимость по сравнению с цилиндрической обмоткой
Непрерывная катушечная из прямоугольного провода	ВН	НН	Высокая электрическая и механическая прочность, хорошее охлаждение	Необходимость перекладки половины катушек при намотке
Цилиндрическая многослойная и катушечная из алюминиевой фольги	НН	ВН	Высокая механическая прочность, хорошее заполнение окна магнитной системы	Сложная технология изготовления обмоток ВН

различных типов обмоток масляных трансформаторов

Материал обмоток	Пределы применения, включительно				Число параллельных проводов		Схемы регулирования напряжения
	по мощности трансформатора S, кВ·А	по току на стержень I, А	по напряжению U, кВ	по сечению витка II, мм ²	от	до	
Медь	До 630	От 15—18 до 800	До 6	От 5,04 до 250	1	4—8	—
Алюминий	До 630	От 10—13 до 600—650	До 6	От 7,21 до 300			
Медь	От 630 до 80 000	От 15—18 до 1000—1200	10 и 35	От 5,04 до 400	1	4—8	Рис. 6-6, а, б
Алюминий	До 16 000—25 000	От 10—13 до 1000—1200	10 и 35	От 7,21 до 500			
Медь	До 630	От 0,3—0,5 до 80—100	До 35	От 0,1134 до 42,44	1	- 2	Рис. 6-6, а, б
Алюминий	До 630	От 2—3 до 125—135	До 35	От 1,43 до 50,24	1	1	
Медь	От 100 и выше	От 300 и выше	До 35	От 75—100 и выше	4	12—16 и более	—
Алюминий	От 100 и выше	От 150—200 и выше	До 35	От 75—100 и выше			
Медь	От 160 и выше	От 15—18 и выше	От 3 до 110—220	От 5,04 и выше	1	3—5	Рис. 6,6, в, г
Алюминий	От 100 и выше	От 10—13 и выше	От 3 до 110—220	От 7,21 и выше			
Алюминий	От 25 до 630	От 1,5 до 300	До 10	От 1 до 120	1	1	—

В тех случаях, когда возможно применить два различных типа обмотки, если нет других указаний, следует, как правило, отдавать предпочтение типу, более простому и дешевому в производстве. Если к трансформатору предъявляются какие-либо специальные требования, например повышенной механической или электрической прочности или другие, следует выбирать тип обмотки, наиболее отвечающий этим требованиям.

В сухих трансформаторах могут быть применены те же основные типы обмоток, которые применяются в масляных трансформаторах при условии уменьшения плотности тока согласно табл. 5-7 и увеличения размеров охлаждающих каналов согласно табл. 9-2. При выборе типа обмоток для сухого трансформатора можно пользоваться табл. 5-8 с сохранением всех пределов применения обмоток, кроме предела применения по току на один стержень и напряжению. Цифры таблицы для тока должны быть снижены на 30—35%, а номинальное напряжение обмоток не должно быть более 15 кВ.

При расчете обмоток существенное значение имеет правильный выбор размеров провода. В обмотках из провода круглого сечения обычно выбирается провод, ближайший по площади поперечного сечения к сечению I , определяемому по выбранной плотности тока $\Delta_{\text{ср}}$, или в некоторых случаях подбираются два-три провода с соответствующим общим суммарным сечением.

При расчете витковых, катушечных и в большинстве случаев двух- и многослойных цилиндрических обмоток из провода прямоугольного сечения желательно применять наиболее крупные сечения провода, что упрощает намотку обмотки на станке и позволяет получить наиболее компактное ее размещение на магнитной системе. Однако применение наиболее крупных размеров провода ограничивается условиями охлаждения обмотки и допустимыми добавочными потерями от вихревых токов, вызываемых полем рассеяния.

Превышение температуры поверхности обмотки над окружающим маслом определяется по плотности теплового потока на поверхности обмотки, т. е. по потерям в обмотке, отнесенным к единице поверхности охлаждения q (Вт/м²). Значение q в целях недопущения чрезмерного нагрева обмоток в трансформаторах с естественным масляным охлаждением ограничивается $q \leq 1200 \div 1400$ Вт/м² и во всяком случае не более 1600 Вт/м².

В трансформаторах с искусственной циркуляцией масла допускают $q \leq 2000 \div 2200 \text{ Вт/м}^2$. Превышение указанных значений q приводит к существенному увеличению массы системы охлаждения трансформатора. Высокие значения q определяют также значительный нагрев масла в каналах обмоток, что ускоряет старение масла. Снижение допустимых значений q для медных обмоток примерно до 1000 Вт/м^2 позволит существенно замедлить старение масла и удлинить сроки его замены. Для алюминиевых обмоток значения q обычно получаются на 20—25% ниже, чем для медных.

В обмотках сухих трансформаторов могут быть допущены различные значения q в зависимости от класса нагревостойкости изоляции и размеров охлаждающих каналов. Выбор размеров вертикальных и горизонтальных каналов и соответствующих значений q , обеспечивающих получение допустимых превышений температуры, может быть сделан по табл. 9-2б и 9-2в.

При изоляции класса нагревостойкости А для внутренних обмоток при вертикальных каналах шириной 1,0 см и горизонтальных 0,8 см можно допустить $q \leq 280 \text{ Вт/м}^2$. Для наружных обмоток, имеющих только одну внешнюю поверхность (обмотка, намотанная на цилиндре без канала), можно допустить $q \leq 600 \text{ Вт/м}^2$.

Предельное значение большего из двух размеров прямоугольного провода b , см, (рис. 7-3, в) в катушечных и винтовых обмотках может быть выбрано по формулам § 7-1:

для медного провода

$$b \leq qk_3/107\Delta^2, \quad (5-6)$$

для алюминиевого провода

$$b \leq qk_3/172\Delta^2. \quad (5-7)$$

При этом следует принять $k_3 = 1,0$. Выбор предельного значения b может быть сделан также по кривым рис. 5-38. Если размер b получается близким к предельному размеру по сортаменту табл. 5-2 или 5-3 или выходит за эти пределы, то в катушечной обмотке можно выбрать действительный размер провода, равный половине или меньше половины найденного по формуле или по кривым рис. 5-38, удвоить катушки и сделать радиальные масляные каналы через две катушки. В одноходовой винтовой обмотке в этом случае можно сделать

радиальные масляные каналы не через один виток, а через два; в двухходовой винтовой обмотке можно отказаться от радиальных каналов между ходами. В алюминиевых обмотках трансформаторов мощностью до 6300 кВ·А возможность удвоить витки в винтовой обмотке или катушки в непрерывной катушечной обмотке представляется достаточно часто.

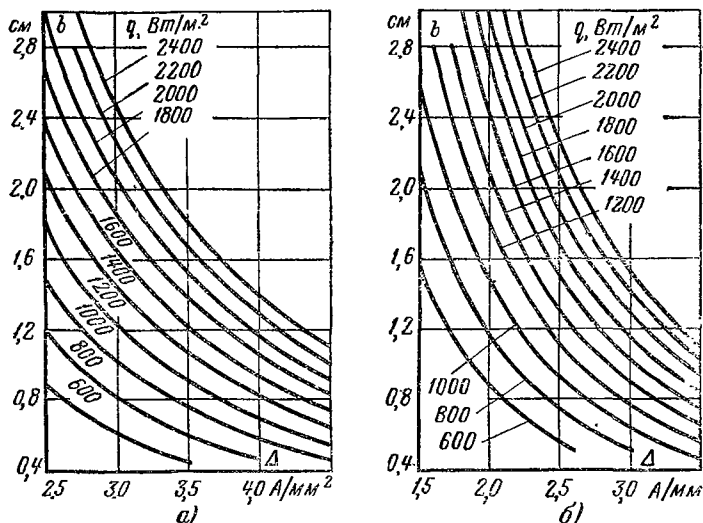


Рис. 5-38. Графики для ориентировочного определения размера провода b по заданным q от 600 до 2400 Вт/м² и Δ в катушечных, винтовых и цилиндрических обмотках из прямоугольного провода.

a — медный провод; b — алюминиевый провод.

В одно- и двухслойных цилиндрических обмотках (рис. 7-3, a) ограничение большего размера сечения провода имеет значение только при намотке на ребро. В этом случае следует пользоваться вышеприведенными формулами при $k_s \approx 0,75$, а найденные по кривым рис. 5-38 значения b умножать на 0,75.

В многослойной цилиндрической обмотке из прямоугольного провода размер провода b определяется при $k_s = 0,8$ по (5-6) или (5-7) или по графикам рис. 5-38 при том же k_s и его следует понимать как сумму размеров металла проводов в радиальном направлении обмотки между двумя осевыми охлаждающими каналами.

**Ориентировочные предельные радиальные размеры провода, см,
цилиндрических обмоток из прямоугольного провода
при добавочных потерях, не превышающих 5, 10, 15 и 20%**

Число слоев обмотки	Медные обмотки				Алюминиевые обмотки			
	Добавочные потери до				Добавочные потери до			
	5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%
1	1,0	1,18	1,25	1,32	1,16	1,35	1,56	1,68
2	0,71	0,80	0,85	0,95	0,86	1,00	1,08	1,16
3	0,56	0,63	0,71	0,75	0,64	0,80	0,93	1,00
4	0,475	0,56	0,63	0,71	0,59	0,69	0,80	0,86
5	0,40	0,50	0,56	0,60	0,51	0,64	0,69	0,74
6	0,375	0,475	0,50	0,56	0,47	0,59	0,64	0,69
7	0,355	0,425	0,475	0,50	0,44	0,55	0,60	0,65
8	0,335	0,400	0,450	0,475	0,41	0,51	0,55	0,60
9	0,315	0,375	0,425	0,450	0,38	0,47	0,51	0,55
10	0,300	0,355	0,400	0,425	0,38	0,44	0,51	0,55

Если, например, в многослойной обмотке из алюминиевого провода при $\Delta = 1,8 \text{ А/мм}^2$, при допустимом значении $q = 1400 \text{ Вт/м}^2$ по (5-7) $b = \frac{1400 \cdot 0,8}{172 \cdot 1,8^2} \approx 2,0 \text{ см}$, то это

значит, что между двумя осевыми каналами можно уложить из сортамента табл. 5-3 четыре слоя проводов по 5,1 мм или пять слоев по 4,1 мм и т. д. Также можно определить предельный радиальный размер провода в винтовой обмотке, не имеющей радиальных каналов.

При намотке провода на ребро в обмотках с осевым направлением потока рассеяния существенно увеличиваются добавочные потери, вызываемые вихревыми токами, чем также ограничивается наибольший размер сечения провода b . В наиболее распространенной цилиндрической обмотке из прямоугольного провода стремятся выбрать радиальный размер провода так, чтобы добавочные потери не превысили 5% основных электрических потерь. В некоторых, сравнительно редких случаях допускают добавочные потери до 10%.

Для ориентировочного выбора максимально допустимого значения радиального размера прямоугольного провода в цилиндрических обмотках с числом слоев от 1 до 10 можно воспользоваться табл. 5-9, где приведены предельные значения радиального размера провода,

большого при намотке на ребро и меньшего при намотке плашмя, дающего добавочные потери до 5; 10; 15 и 20% от основных потерь. С ростом числа слоев обмотки существенно возрастают добавочные потери и уменьшается максимально допустимый размер провода. По этой таблице можно также определить предельный радиальный размер провода в винтовой обмотке, не имеющей радиальных каналов.

В винтовых и катушечных обмотках с радиальными каналами при прочих равных условиях (одинаковое число слоев, одинаковые размеры провода, одинаковое число витков или одинаковая высота обмотки) индукция поля рассеяния оказывается существенно ниже, чем в обмотках, не имеющих этих каналов, и добавочные потери составляют от 0,4 до 0,6 добавочных потерь в обмотках без каналов. При этом предельный радиальный размер провода в обмотках с радиальными каналами может быть принят на 25-15% выше, полученного из табл. 5-9.

Глава шестая

РАСЧЕТ ОБМОТОК

6-1. РАСЧЕТ ОБМОТОК НН

Расчет обмоток трансформатора, как правило, начинают с обмотки низшего напряжения, располагаемой у большинства трансформаторов между стержнем и обмоткой ВН. В трехобмоточном трансформаторе расчет обмоток начинают с внутренней обмотки НН или СН, а затем постепенно переходят к СН или НН и ВН.

Число витков на одну фазу обмотки НН определяется по формуле

$$\omega_1 = \frac{U_{\Phi 1} \cdot 10^4}{4,44 f B_c \Pi_c} \quad (6-1)$$

Полученное значение ω_1 округляется до ближайшего целого числа и может быть как четным, так и нечетным числом. Для трехфазного трансформатора или однофазного с параллельным соединением обмоток стержней найденное по (6-1) значение ω_1 является также числом витков на один стержень. Для однофазного трансформатора

тора с последовательным соединением обмоток стержней число витков на один стержень, как правило, равно половине найденного значения w_1 . После округления числа витков следует найти э. д. с. одного витка, В,

$$u_v = U_{\text{ф1}}/w_1, \quad (6-2)$$

и действительную индукцию в стержне, Т,

$$B_c = \frac{u_v \cdot 10^4}{4,44 f \Pi_c}. \quad (6-3)$$

Дальнейший расчет для каждого типа обмоток НН производится своим особым путем.

1. Расчет цилиндрических обмоток двухслойных и однослойных из прямоугольного провода. Число слоев обмотки (рис. 6-1) выбирается обычно равным 2. Для трансформаторов с мощностью на один стержень до 4—6 кВ·А и в отдельных случаях для более мощных обмотка может быть намотана также в один слой.

Число витков в одном слое: для однослойной обмотки

$$w_{\text{сл1}} = w_1; \quad (6-4)$$

для двухслойной обмотки

$$w_{\text{сл1}} = w_1/2. \quad (6-4')$$

Ориентировочный осевой размер витка, см,

$$h_{\text{в1}} = \frac{l_1}{w_{\text{сл1}} + 1}. \quad (6-5)$$

Ориентировочное сечение витка, мм²,

$$\Pi_1 = I_1/\Delta_{\text{ср}}, \quad (6-6)$$

где $\Delta_{\text{ср}}$ — предварительное значение по (5-4) или (5-5).

К полученным величинам Π_1 и $h_{\text{в1}}$ по сортаменту обмоточного провода для трансформаторов (табл. 5-2 или 5-3) подбираются подходящие провода с соблюдением следующих правил:

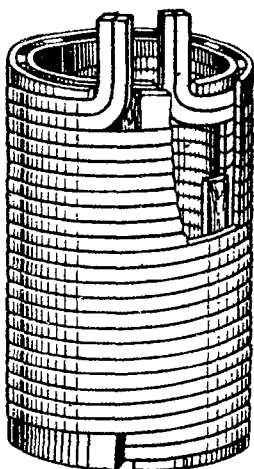


Рис. 6-1. Двухслойная цилиндрическая обмотка из прямоугольного провода.

а) число параллельных проводов $n_{в1}$ не более 4—6 при намотке плашмя и не более 6—8 при намотке на ребро;

б) все провода имеют одинаковые размеры поперечного сечения (в отдельных случаях не более двух различных сечений);

в) радиальные размеры всех параллельных проводов витка равны между собой;

г) радиальные размеры проводов не выходят за предельные размеры, найденные по формулам, кривым или таблицам § 5-7 по предельному q , Вт/м² (обычно для масляных трансформаторов $q \leq 1200$ Вт/м² и в редких случаях $q \leq 1400 \div 1500$ Вт/м²), или по допустимым добавочным потерям (обычно не более 5%, см. табл. 5-9). В сухих трансформаторах следует принимать $q \leq 280$ Вт/м² при классе нагревостойкости изоляции А и 320 Вт/м² при классе В;

д) при намотке на ребро отношение радиального размера провода к осевому его размеру не менее 1,3 и не более 3;

е) расчетная высота обмотки $(w_{сл} + 1)h_{в1}$ на 0,5—1,5 см меньше l .

Подобранные размеры провода записываются так:

$$\text{Число параллельных проводов} \times \frac{\text{Размеры провода без изоляции}}{\text{Размеры в изоляции}},$$

или

$$n_{в1} \times \frac{a \times b}{a' \times b'}.$$

Полное сечение витка из $n_{в1}$ параллельных проводов определяется по формуле

$$P_1 = \sum_{i=1}^{n_{в1}} P'_i, \quad (6-7)$$

где P'_i — сечение одного провода, мм².

Осевой размер витка (высота) определяется согласно рис. 6-2.

Полученная плотность тока, А/мм²,

$$\Delta_1 = I/P_1. \quad (6-8)$$

Осевой размер обмотки, см,

$$l_1 = h_{\text{вн}}(w_{\text{сл}} + 1) + (0,5 \div 1,5 \text{ см}). \quad (6-9)$$

Радиальный размер обмотки (обозначения по рис. 6-2 и 6-3), см;
однослойной

$$a_1 = a'; \quad (6-10)$$

двухслойной

$$a_1 = 2a' + a_{\text{и}}. \quad (6-11)$$

Радиальный размер канала $a_{\text{и}}$ при $U_1 \leq 1$ кВ выбирается по условиям изоляции не менее 0,4 см и проверяется по условиям отвода тепла по табл. 9-2. Если действительный радиальный размер провода a равен половине или меньше половины предельного размера, найденного по предельному значению q (см. выше), то канал между слоями может быть заменен жесткой междуслойной изоляцией — двумя слоями электроизоляционного картона по 0,5 мм. В этом случае в (6-11) вместо размера канала подставляется толщина междуслойной изоляции 0,1 см.

При напряжениях более высоких, чем 1 кВ, цилиндрическая обмотка применяется редко. Междуслойная изоляция при этом определяется согласно § 4-5.

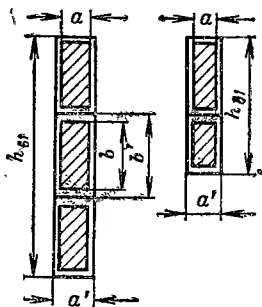


Рис. 6-2. Определение высоты витка.

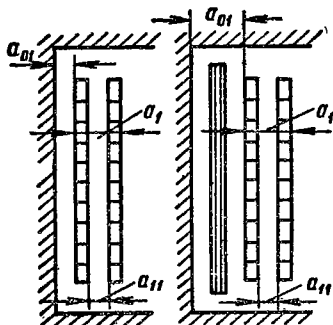


Рис. 6-3. К определению радиальных размеров обмотки.

Внутренний диаметр обмотки, см,

$$D'_1 = d + 2a_{01}. \quad (6-12)$$

Наружный диаметр обмотки, см,

$$D''_1 = D'_1 + 2a_1. \quad (6-13)$$

Ширина a_{01} канала между обмоткой НН и стержнем определяется из условий изоляции обмотки и способа прессовки стержня согласно § 4-5 и 4-6. Однослойная обмотка и двухслойная без охлаждающего канала между слоями имеют две охлаждаемые поверхности. Полная охлаждаемая поверхность обмотки НН, м^2 , для всего трансформатора в этом случае равна:

$$P_{01} = ck\pi (D'_1 + D''_1) l_1 \cdot 10^{-4}. \quad (6-14)$$

Двухслойная обмотка с каналом между слоями шириной не менее, чем указано в табл. 9-2, имеет четыре охлаждаемые поверхности:

$$P_{01} = 2ck\pi (D'_1 + D''_1) l_1 \cdot 10^{-4}, \quad (6-15)$$

где c — число активных (несущих обмотки) стержней. Коэффициент k учитывает закрытие части поверхности обмотки рейками и другими изоляционными деталями. При предварительном расчете может быть принято $k=0,75$.

После определения потерь короткого замыкания для обмотки НН (§ 7-1) следует найти плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$, на поверхности обмотки по формуле

$$q_1 = P_{\text{осн}} k_{\text{дл}} / P_{01} \quad (6-16)$$

или по (7-17), или (7-17').

Полученное значение q во избежание чрезмерного повышения температуры обмотки необходимо выдерживать в пределах, указанных в § 5-7.

Цилиндрическая обмотка из прямоугольного провода для стороны НН может быть намотана и в три-четыре слоя. Расчет такой обмотки проводится также по (6-1) — (6-16) с учетом действительного числа слоев и внесения соответствующих поправок в (6-4); (6-11) и (6-15).

2. Расчет винтовой обмотки (рис. 6-4). Выбор одноходовой или двухходовой (многоходовой) обмотки за-

висит от осевого размера (высоты) одного витка, см, ориентировочно определяемого по формулам:

для одноходовой обмотки

$$h_{в1} = \frac{l_1}{w_1 + 4} - h_{к1}; \quad (6-17)$$

для двухходовой обмотки с равномерно распределенной транспозицией

$$h_{в1} = \frac{l_1}{w_1 + 1} - h_{к1}; \quad (6-18)$$

где $h_{к1}$ — осевой размер масляного охлаждающего канала между витками. Ориентировочно $h_{к1}$ может быть принят $h_{к1} \approx 0,1 a_1$, но не менее 0,4 см, где a_1 — радиальный размер обмотки НН, приближенно определенный по (3-71).

Максимальный возможный осевой размер витка одноходовой обмотки равен максимальному размеру обмоточного провода в изоляции, т. е. не может превышать 1,55 см для медного и 1,85 см для алюминиевого провода. Поэтому при получении по (6-17) $h_{в1} \leq 1,55$ см для медного и $h_{в1} \leq 1,85$ см для алюминиевого провода следует применять одноходовую обмотку. При получении по этой формуле $3,5 \div 4,5 \geq h_{в1} \geq 1,55$ см (или 1,85 см) по аналогичным соображениям может быть применена двухходовая обмотка. Более точное определение $h_{в1}$ в этом случае дает формула (6-18). В сравнительно редких случаях, например для трехфазного трансформатора мощностью 1600 кВ·А при напряжении НН 400 В и токе обмотки фазы НН 2309 А, может быть применена четырехходовая обмотка.

Ориентировочное сечение витка Π_1 находится по (6-6).

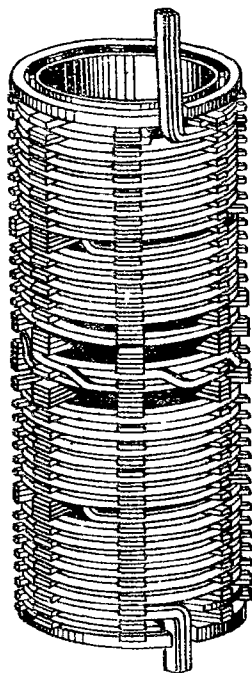


Рис. 6-4. Одноходовая винтовая параллельная обмотка с тремя транспозициями.

После определения числа ходов обмотки следует проверить полученный осевой размер витка $h_{в1}$ по допустимой плотности теплового потока на поверхности обмотки q по формуле (5-6) или (5-7) или по графикам рис. 5-38. Если найденный осевой размер витка $h_{в1}$ составляет не более половины b , найденного по этим формулам или графикам, то в одноходовой обмотке можно сделать радиальные каналы через два витка. В двухходовой обмотке масляный канал между двумя группами проводов витка можно заменить прокладкой с толщиной $2 \times 0,05$ см, если $h_{в1} - h_{к1} \leq b$.

В том случае, когда плотность тока в медном проводе обмотки не превышает $2,2 - 2,5$ А/мм² и в алюминиевом $1,4 - 1,8$ А/мм², возможно применение винтовой обмотки без радиальных каналов с плотным прилеганием витков. Высота одного витка такой обмотки может быть найдена по (6-17) или (6-18) при $h_{к1} = 0$: Если по формуле (6-17) $h_{в1} \leq 1,55$ см для медного или $h_{в1} \leq 1,85$ см для алюминиевого провода, то возможна одноходовая обмотка. При получении по формуле (6-18) $3,1 \div 3,7 \geq h_{в1} \geq 1,55 \div 1,85$ см следует принять двухходовую конструкцию.

Возможность применения этой обмотки определяется по § 5-7. По формулам (5-6) или (5-7) находится общий радиальный размер металла проводов b при $q = 1500$ Вт/м² и $k_3 = 0,8$. Число и радиальные размеры проводов витка (половины витка в двухходовой обмотке) должны быть выбраны так, чтобы сумма их радиальных размеров не была больше b , а радиальный размер каждого провода не превосходил значение, найденное по табл. 5-9, при выбранном числе проводов и принятом уровне добавочных потерь.

В том случае, когда радиальный размер одноходовой обмотки без радиальных каналов оказывается существенно больше размера b , найденного по допустимому q , возможно применение двухходовой двухслойной винтовой обмотки с последовательным соединением слоев и осевым масляным каналом между слоями шириной около 0,01 л. При относительно большом числе витков возможно также применение одноходовой двухслойной обмотки.

После окончательного выбора конструкции обмотки к полученным ориентировочным значениям Π_1 и $h_{в1}$ по сортаменту обмоточного провода (табл. 5-2 и 5-3) под-

бираются подходящие сечения провода с соблюдением следующих требований:

1) минимальное число параллельных проводов в однофазовой обмотке — четыре, в двухфазовой — восемь;

2) все параллельные провода имеют одинаковые размеры и площадь поперечного сечения;

3) в обмотке с радиальными каналами больший размер провода не выходит за предельный размер, найденный по (5-6) или (5-7) или по графикам рис. 5-38 по предельно допускаемому значению q ;

4) в обмотке без радиальных каналов радиальный размер и число проводов в радиальном направлении выбраны с учетом допустимого значения q и допустимого уровня добавочных потерь;

5) расчетная высота обмотки при выбранных размерах проводов и радиальных каналов равна предварительно рассчитанной величине.

Подобранные размеры проводов записываются так:

$$\text{Число параллельных проводов} \times \frac{\text{Размеры провода без изоляции}}{\text{Размеры провода в изоляции}},$$

или

$$n_{\text{в1}} \times \frac{a \times b}{a' \times b'}.$$

Полное сечение витка

$$P_1 = n_{\text{в1}} P'_1, \quad (6-19)$$

где P'_1 — сечение одного провода.

Плотность тока, А/мм²,

$$\Delta = I_1 / P_1. \quad (6-20)$$

Осевой размер витка $h_{\text{в1}}$ и радиальный размер обмотки для одно- и двухфазовой обмоток определяются по рис. 6-5.

Осевой размер (высота) обмотки, опрессованной после сушки трансформатора l_1 , см, определяется по следующим формулам:

для однофазовой обмотки (рис. 6-5, а) с тремя транспозициями

$$l_1 = b' (w_1 + 4) + kh_{\kappa} (w_1 + 3); \quad (6-21)$$

для одноходовой обмотки с каналами через два витка (рис. 6-5, б) и с тремя транспозициями

$$l_1 = b'(w_1 + 1) + k \left[h_k \left(\frac{w_1}{2} + 2 \right) + \delta \frac{w_1}{2} \right], \quad (6-22)$$

где δ — толщина прокладки между сведенными витками, обычно равна 0,1—0,15 см;

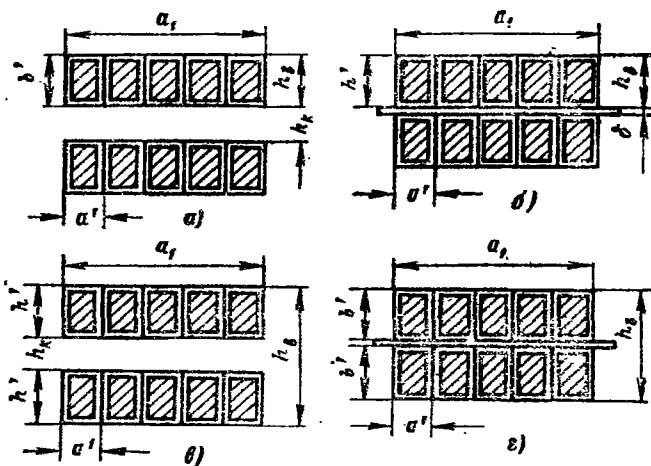


Рис. 6-5. Определение осевого размера витка и радиального размера для винтовой обмотки.

для двухходовой обмотки с равномерно распределенной транспозицией по рис. 6-5, в

$$l_1 = 2b'(w_1 + 1) + kh_k(2w_1 + 1); \quad (6-23)$$

для двухходовой обмотки без канала между двумя группами проводов по рис. 6-5, г

$$l_1 = 2b'(w_1 + 1) + k[h_k w_1 + \delta(w_1 + 1)]. \quad (6-24)$$

Коэффициент k в (6-21)—(6-24) учитывает усадку междукатушечных прокладок после сушки и опрессовки обмотки и может быть принят $k=0,94 \div 0,96$ (в некоторых случаях до 0,90).

Осевой размер обмотки без радиальных каналов одноходовой и двухходовой может быть найден по формулам (6-21) или (6-23) при $h_k=0$.

Радиальный размер обмотки, a_1 , см, определяется по рис. 6-5.

Внутренний диаметр обмотки, см,

$$D'_1 = d + 2a_{01}. \quad (6-25)$$

Наружный диаметр обмотки, см,

$$D''_1 = D'_1 + 2a_1. \quad (6-26)$$

Ширина a_{01} канала между обмоткой НН и стержнем определяется из условий изоляции обмотки и способа прессовки стержня согласно § 4-5 и 4-6. После определения потерь короткого замыкания (§ 7-1) следует найти плотность теплового потока на поверхности обмотки q по (7-19) — (7-19'') для обмотки с радиальными каналами или по (7-17) или (7-17') для обмотки без радиальных каналов и сравнить полученное q с допустимыми значениями.

Расположение транспозиций по длине обмотки определяется числом витков, которые следует отсчитать при ее намотке от начала до середины каждой транспозиции. В обмотке с сосредоточенной транспозицией групповые транспозиции размещаются на $1/4\omega_1$ и $3/4\omega_1$ от начала обмотки, общая транспозиция располагается на $2/4\omega_1$. В двухходовых обмотках с равномерно распределенной транспозицией общее число транспозиций принимается равным числу параллельных проводов $n_{в1}$ или $2n_{в1}$. Первая транспозиция располагается соответственно на расстоянии $\omega_1/2n_{в1}$ или $\omega_1/4n_{в1}$ витков от начала намотки, а все последующие на интервалах $\omega_1/n_{в1}$ или $\omega_1/2n_{в1}$ витков между соседними транспозициями. Все интервалы, на которых располагаются транспозиции, могут быть как целыми, так и дробными числами. Знаменателем дроби во всех случаях должно быть число реек по окружности обмотки. Транспозиции в винтовой обмотке без радиальных каналов рассчитываются так же, как и в обмотке с каналами. В одноходовой двухслойной обмотке не менее трех транспозиций должны быть сделаны в каждом слое.

6-2. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ОБМОТОК ВН

При выборе типа обмотки ВН следует учитывать необходимость выполнения в обмотке ответвлений для регулирования напряжения. В ГОСТ 16110-70 пре-

дусмотрены два вида регулирования напряжения силового трансформатора: а) регулирование напряжения путем переключения ответвлений обмотки без возбуждения (ПБВ) после отключения всех обмоток трансформатора от сети и б) регулирование напряжения без перерыва нагрузки (РПН), без отключения обмоток трансформатора от сети.

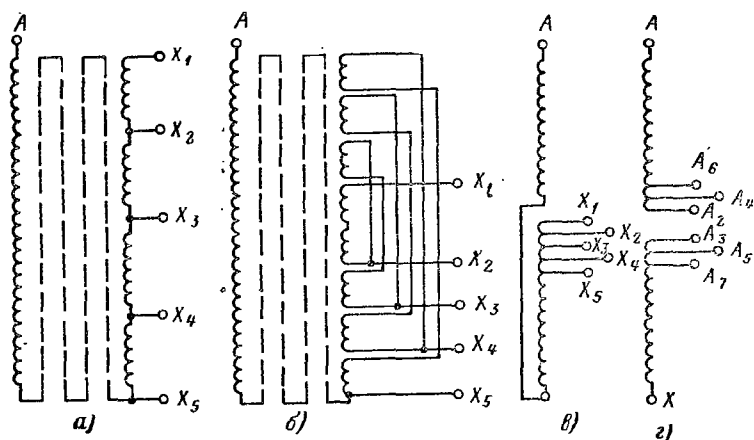


Рис. 6-6. Различные схемы выполнения ответвлений в обмотке ВН при регулировании напряжения без возбуждения ПБВ.

а) В масляных трансформаторах мощностью от 25 до 200 000 кВ·А с ПБВ стандартами ГОСТ 12022-66; 11920-73 и 12965-74 предусмотрено выполнение в обмотках ВН (и СН) четырех ответвлений на $+5$; $+2,5$; $-2,5$ и -5% от номинального напряжения помимо основного зажима с номинальным напряжением. Некоторые трансформаторы, например трансформатор 250 000 кВ·А класса напряжения 110 кВ, могут вообще не иметь ответвлений. Переключение ответвлений обмоток должно производиться специальными переключателями, встроенными в трансформатор, с выведенными из бака рукоятками управления.

б) В сухих трансформаторах применяется регулирование напряжения ВН на $\pm 2 \times 2,5\%$ по схеме на рис. 6-6, г. Регулировочные ответвления выводятся на доску зажимов, и пересоединение с одной ступени на

другую осуществляется при отключении всех обмоток трансформатора от сети путем перестановки контактной пластины, зажимаемой под гайки контактных шпилек.

На рис. 6-6 показаны наиболее употребительные схемы выполнения регулировочных ответвлений в обмотках ВН и СН трансформаторов и стандартные обозначения начал, концов и ответвлений обмоток ВН. Схемы регулирования напряжения вблизи нулевой точки при соединении обмотки в звезду по рис. 6-6, а—в допускают применение наиболее простого и дешевого переключателя — одного на три фазы трансформатора. В этих схемах рабочее напряжение между отдельными частями переключателя не превышает 10% линейного напряжения трансформатора. В схеме по рис. 6-6, г часто применяют отдельные переключатели для обмотки каждой фазы трансформатора. Выполнение одного трехфазного переключателя для схемы 6-6, г представляет некоторые трудности, так как рабочее напряжение между отдельными его частями может достигать 50% номинального напряжения обмотки, однако и такие переключатели находят широкое применение.

Схема по рис. 6-6, а для регулирования напряжения при многослойной цилиндрической обмотке применяется в трансформаторах мощностью до 160 кВ·А. В трансформаторах мощностью от 250 кВ·А и выше механические силы, действующие на отдельные витки при коротком замыкании трансформатора (§ 7-3), могут быть опасными и регулировочные витки обмотки ВН, обычно располагаемые в ее наружном слое, рекомендуется размещать симметрично относительно середины высоты обмотки, например по схеме рис. 6-6, б. Намотка регулировочных витков ведется тем же проводом и с тем же направлением намотки, что и основных витков обмотки.

По схеме на рис. 6-6, в может выполняться регулирование напряжения при многослойной цилиндрической катушечной и катушечной обмотке при номинальном напряжении до 38,5 кВ. При этом одна половина обмотки мотается правой, а другая левой намоткой. Схема на рис. 6-6, г может применяться для тех же обмоток, что и схема на рис. 6-6, в при номинальном напряжении от 3 до 220 кВ.

При соединении обмотки ВН в треугольник задача расположения регулировочных витков усложняется.

В схемах регулирования по рис. 6-6, а и б регулировочные витки каждой фазной обмотки присоединяются к линейному зажиму соседней фазы и рабочее напряжение между контактами различных фаз на переключателе достигает 100% номинального напряжения обмотки. Для многослойных цилиндрических обмоток это неизбежно. Непрерывная катушечная обмотка при соединении в треугольник с расположением регулировочных витков по схеме на рис. 6-6, г, допускает применение переключателей тех же типов, что и при соединении в звезду. Схема по рис. 6-6, в при соединении обмотки в треугольник не применяется.

При регулировании напряжения по схемам на рис. 6-6, в и г в месте разрыва обмотки в середине ее высоты образуется изоляционный промежуток в виде горизонтального радиального масляного канала. Иногда этот канал заполняется набором шайб, изготовленных из электроизоляционного картона. Размер этого промежутка по схеме рис. 6-6, в определяется половиной фазного напряжения обмотки, а при схеме по рис. 6-6, г — примерно 0,1 фазного напряжения. Увеличение этого промежутка нежелательно, так как приводит к существенному увеличению осевых механических сил в обмотках при коротком замыкании, возрастающих также и с ростом мощности трансформатора. Именно это обстоятельство ограничивает применение схемы по рис. 6-6, в напряжением не выше 38,5 кВ и мощностью не более 1000 кВ·А. Размер изоляционного промежутка в месте разрыва обмотки и его заполнение определяются в соответствии с указаниями § 4-5.

Регулировочные ответвления на обмотках ВН (или СН) служат обычно для поддержания напряжения у потребителей электрической энергии на одном уровне при колебаниях нагрузки. В меньшей мере регулировочными ответвлениями пользуются для какого-либо произвольного изменения вторичного напряжения. У понижающих трансформаторов при необходимости повысить или понизить напряжение на вторичной стороне НН следует на первичной стороне ВН переходить соответственно на меньшее или большее число витков. У повышающих трансформаторов переходят на большее или меньшее число витков обмотки ВН в соответствии с необходимостью повысить или понизить напряжение на вторичной стороне ВН. Поддержание стабильного напряжения при

постоянно изменяющейся нагрузке при необходимости перерыва нагрузки и ручном управлении переключателями чрезвычайно затруднительно, так как требует много времени и не может быть автоматизировано.

Для повышения гибкости и удобства управления крупными электрическими сетями и системами большое значение имеет возможность регулирования напряжения трансформаторов без перерыва нагрузки и отключения трансформатора от сети при дистанционном ручном или автоматическом управлении. Потребность в таких трансформаторах быстро возрастает. В соответствии с этими требованиями стандартами ГОСТ 12022-66; ГОСТ 11920-73 и ГОСТ 12965-74 предусмотрен выпуск трансформаторов с РПН для всех мощностей от 63 до 200 000 кВ·А. Установлены следующие пределы регулирования:

63—630 кВ·А, 6; 10; 20 и 35 кВ	$\pm 6 \times 1,67 = \pm 10\%$
1000—6300 кВ·А, 20 и 35 кВ	$\pm 6 \times 1,5 = \pm 9\%$
1000—6300 кВ·А, 6 и 10 кВ	$\pm 8 \times 1,25 = \pm 10\%$
10 000—63 000 кВ·А, от 10 до 35 кВ	$\pm 8 \times 1,5 = \pm 12\%$
6300—80 000 кВ·А, 110 кВ	$\pm 9 \times 1,78 = \pm 16\%$

Наиболее употребительные схемы для регулирования напряжения под нагрузкой показаны на рис. 6-7. Трансформаторы с напряжением ВН 10 кВ мощностью до 6300 кВ·А и 35 кВ до 63 000 кВ·А могут выполняться с РПН по схеме на рис. 6-7, а. Аппаратура РПН в обмотках класса напряжения 110 кВ имеет класс напряжения 35 кВ и встраивается в нейтраль этих обмоток (рис. 6-7, б). Нейтраль должна быть заземлена наглухо. Схема устройства по рис. 6-7, в обычно применяется при регулировании напряжения на линейном конце обмотки. Не исключено ее использование при регулировании в нейтрали.

На рис. 6-8 показаны схема переключающего устройства и порядок перехода с одной ступени напряжения — ответвления X_3 — на другую X_4 без перерыва рабочего тока.

Устройство по рис. 6-7, а может быть сделано для класса напряжения не более 35 кВ. Это устройство при регулировании напряжения у нейтрали по рис. 6-7, б может применяться также в обмотках классов напряжения 110 и 220 кВ. Для регулирования напряжения у линейного конца обмотки, что особенно важно для автотрансформаторов, может быть использовано быстродействующее устройство по рис. 6-7, в. Ток короткого замыкания участка обмотки между соседними ответвлениями при переходе с одной ступени на другую в устройствах по рис. 6-7, а и б ограничивается реактором, по рис. 6-7, в активными сопротивлениями. Время протекания ограниченного тока короткого замыкания в схеме по рис. 6-7, а и б составляет около 1 с, в схеме по рис. 6-7, в измеряется сотыми долями секунды. Общее время перехода с одной ступени на соседнюю в том и другом случае около 3 с.

В трансформаторах класса напряжения до 35 кВ включительно при мощностях до 6300 кВ·А возможно применение несколько упрощенной схемы по рис. 6-7, а, но без выключателей B_1 и B_2 . В этом случае переход с одной ступени на другую совершается в два приема: с положения 1 на положение 3 и затем на 5 по рис. 6-8. При этой схеме переключатели Π_1 и Π_2 должны располагаться в от-

дельном баке, масло которого не сообщается с маслом в баке трансформатора.

При регулировании напряжения на катушечных обмотках ВН, даже при переключении без возбуждения с регулированием в пределах $\pm 5\%$, во время работы трансформатора на низшей ступени напряжения 10% витков обмотки ВН отключаются и в этой части

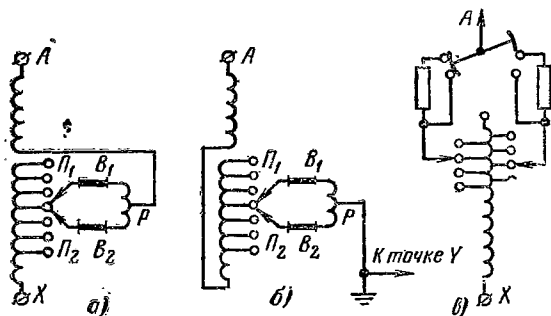


Рис. 6-7. Схемы регулирования напряжения под нагрузкой.

а — при классе напряжения обмотки до 35 кВ; б — при классе напряжения обмотки 110 кВ; в — при классе напряжения обмотки 110 кВ и более.

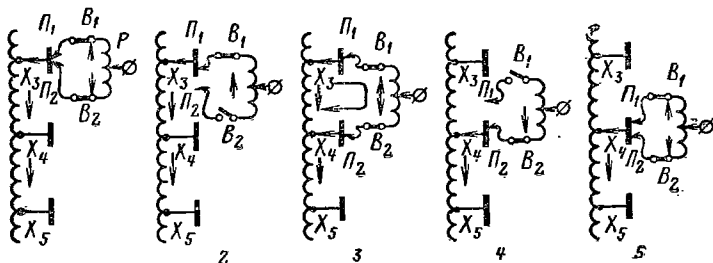


Рис. 6-8. Схема устройства переключения под нагрузкой с токоограничивающим реактором и последовательность операций при переходе с одной ступени на другую.

обмотки возникает небаланс токов ВН и НН. Вследствие этого существенно возрастают поперечная составляющая поля рассеяния и осевые механические силы при коротком замыкании трансформатора. В значительно большей степени на осевых силах сказывается отключение части витков обмотки ВН при регулировании без прерыва нагрузки с пределами $\pm 12\text{--}16\%$.

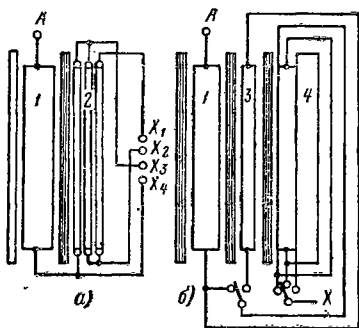
В целях повышения динамической стойкости обмоток при коротком замыкании обычно принимаются меры, направленные на уменьшение осевых сил и на усиление конструкции обмоток в механическом отношении. Для уменьшения осевых сил в трансформаторах ПБВ рекомендуется в обмотке НН на участках, находящихся на

одном уровне с регулировочной частью обмотки ВН, т. е. обычно в середине высоты обмотки, делать разгон витков на половину высоты зоны регулирования.

В трансформаторах РПН в последнее время находят применение обмотки ВН, состоящие из двух или чаще трех concentрических обмоток — основной части обмотки ВН, обмотки грубого регулирования $PO_{\text{груб}}$, имеющей напряжение, равное напряжению нескольких ступеней, и обмотки тонкого регулирования $PO_{\text{тонк}}$ с несколькими ступенями с напряжением ступени от 1,25 до 1,78% номинального напряжения обмотки ВН. Витки, создающие напряжение каждой ступени, распределяются равномерно по всей высоте обмотки. Включение или отключение одной или нескольких ступеней не создает небаланса токов на отдельных участках по высоте обмоток ВН и НН.

Рис. 6-9. Схемы расположения основной и регулировочной частей обмотки ВН в трансформаторах, регулируемых под нагрузкой РПН.

1 — основная обмотка; 2 — регулировочная обмотка; 3 — обмотка грубого регулирования; 4 — обмотка тонкого регулирования.



На рис. 6-9, а показана обмотка ВН, выполненная в виде непрерывной катушечной обмотки в основной части и трехслойной цилиндрической обмотки в регулировочной части. Получила распространение также обмотка ВН, состоящая из трех концентров — внутренней катушечной обмотки в основной части, такой же средней по расположению обмотки грубого регулирования, включаемой или выключаемой полностью, и из внешней винтовой обмотки тонкого регулирования из нескольких параллельных проводов с числом витков, равным числу витков одной ступени. Каждый из этих проводов образует ступень регулирования (рис. 6-9, б).

Усиление механической прочности обмоток достигается установкой в ярмовой изоляции опорных колец, склеенных из картонных шайб, прошивкой междукатушечных прокладок снаружи обмоток картонными рейками, прессовкой обмоток в осевом направлении нажимными кольцами и некоторыми технологическими операциями — предварительной опрессовкой картонных деталей обмотки, опрессовкой обмоток во время и после сушки и другими.

Наиболее благоприятной в отношении получения наименьших осевых сил при широком регулировании напряжения является многослойная цилиндрическая обмотка, у которой регулировочные витки могут быть распределены практически равномерно по всей ее высоте.

Применение широкого регулирования напряжения, существенно усложняя и удорожая трансформатор (усложнение обмоток, аппаратура регулирования и т. д.), приводит к увеличению расхода металла обмоток, а также размеров и массы магнитной системы.

6-3. РАСЧЕТ ОБМОТОК ВН

Расчет обмоток ВН начинается с определения числа витков, необходимого для получения номинального напряжения, для напряжений всех ответвлений. Число витков при номинальном напряжении определяется по формуле

$$w_{H2} = w_1 \frac{U_{\Phi 2}}{U_{\Phi 1}}. \quad (6-27)$$

Число витков на одной ступени регулирования напряжения при соединении обмотки ВН в звезду равно:

$$w_p = \Delta U / u_v \sqrt{3}, \quad (6-28)$$

где ΔU — напряжение на одной ступени регулирования обмотки или разность напряжений двух соседних ответвлений, В;

u_v — напряжение одного витка обмотки, В.

Обычно ступени регулирования напряжения делают равными между собой, чем обуславливается также и равенство числа витков на ступенях. В этом случае число витков обмотки на ответвлениях равно:

При двух ступенях:

$$\text{верхняя ступень} \quad \dots \quad w_2 = w_{H2} + w_p \quad (6-29)$$

при номинальном напряжении:

$$\text{нижняя ступень} \quad \dots \quad w_{H2} - w_p \quad (6-30)$$

На четырех ступенях:

$$\text{верхние ступени} \quad \dots \quad w_2 = w_{H2} + 2w_p; \quad w_{H2} + w_p \quad (6-31)$$

при номинальном напряжении:

$$\text{нижние ступени} \quad \dots \quad w_{H2} - w_p; \quad w_{H2} - 2w_p. \quad (6-32)$$

Для трехфазного трансформатора или однофазного с параллельным соединением обмоток двух стержней найденное выше $w_{H2} + w_p$ или $w_{H2} + 2w_p$ является числом витков на один стержень. В однофазном трансформаторе с последовательным соединением обмоток двух стержней на одном стержне располагается половина этого числа витков.

Плотность тока Δ , А/мм², в обмотке ВН предварительно определяется по формуле

$$\Delta_2 \approx 2\Delta_{cp} - \Delta_1. \quad (6-33)$$

В тех случаях, когда потери короткого замыкания P_K не заданы, для выбора плотности тока можно руководствоваться табл. 5-7.

Сечение витка обмотки ВН, мм², предварительно определяется по формуле

$$P_2 = I_2 / \Delta_2. \quad (6-34)$$

Предварительное определение числа катушек для многослойной цилиндрической катушечной и катушечной обмоток производится с таким расчетом, чтобы:

- 1) число катушек было четным;
- 2) рабочее напряжение одной катушки при классе напряжения до 35 кВ не превосходило 800—1000 В; при классе напряжения 110 кВ напряжение катушки может достигать 1500—1600 В, а при классе 220 кВ — 2500—3000 В;

3) при номинальном напряжении ВН 35 кВ и выше все витки, служащие для регулирования напряжения, и витки с усиленной изоляцией были размещены в отдельных катушках; катушки, содержащие различные числа витков или отличающиеся размерами или изоляцией, при расчете обычно для удобства обозначаются различными буквами.

Входные витки (катушки) обмотки ВН при ее номинальном напряжении от 20 кВ и выше обычно выполняются с усиленной изоляцией, предотвращающей пробой между витками при воздействии на обмотку импульсных перенапряжений.

Усиленная изоляция делается на входных катушках обмотки каждой фазы с двух ее концов. Расчет усиленной изоляции входных витков и катушек производится согласно указаниям § 4-5.

После того как обмотка ВН рассчитана и размещена на стержне, для предварительной оценки ее нагрева определяется плотность теплового потока на ее охлаждаемой поверхности, Вт/м², по формуле

$$q_2 = \frac{P_{осн2}}{P_{02}} k_{д2}, \quad (6-35)$$

или по (7-19) — (7-19'''). Полученное q должно быть не более допустимого по § 5-7.

Расчет многослойной цилиндрической обмотки из круглого провода (рис. 6-10)

Ориентировочное сечение витка Π_2 определяется по (6-34). По этому сечению и по сортаменту обмоточного провода для трансформаторов (табл. 5-1) подбирается провод подходящего сечения или в отдельных случаях два—три параллельных одинаковых провода с диаметрами провода без изоляции d_2 и провода в изоляции d'_2 . Подобранные размеры провода записываются так:

$$\text{Марка провода} \times n_{в2} \times \frac{d_2}{d'_2},$$

где $n_{в2}$ — число параллельных проводов.

Полное сечение витка, мм^2 ,

$$\Pi_2 = n_{в2} \Pi'_2, \quad (6-36)$$

где Π'_2 — сечение одного провода.

Полученная плотность тока, А/мм^2 ,

$$\Delta_2 = I_2 / \Pi_2. \quad (6-37)$$

Число витков в слое

$$w_{сл2} = \frac{l_2}{n_{в2} d'_2} - 1. \quad (6-38)$$

Число слоев в обмотке

$$n_{сл2} = w_2 / w_{сл2} \quad (6-39)$$

($n_{сл2}$ округляется до ближайшего большего числа).

Рабочее напряжение двух слоев, В,

$$U_{мсл} = 2w_{сл2} u_{в}. \quad (6-40)$$

По рабочему напряжению двух слоев по табл. 4-7 в соответствии с указаниями § 4-5 выбирается число слоев и общая толщина $\delta_{мсл}$ кабельной бумаги в изоляции между двумя слоями обмотки.

В большинстве случаев по условиям охлаждения обмотка каждого стержня выполняется в виде двух концентрических катушек с осевым масляным каналом между ними. Число слоев внутренней катушки при этом должно составлять не более $1/3$ — $2/5$ общего числа слоев обмотки. В случае применения этого типа обмотки на стороне НН

между двумя цилиндрами числа слоев внутренней и наружной катушек делаются равными.

Минимальная ширина масляного канала между катушками выбирается по табл. 9-2. В трансформаторах мощностью на один стержень не более 3—6 кВ.А возможно применение обмотки, состоящей из одной катушки без осевого канала.

Раднальный размер обмотки, см:

одна катушка без экрана

$$a_2 = d'_2 n_{\text{сл}2} + \delta_{\text{мсл}} (n_{\text{сл}2} - 1); \quad (6-41)$$

две катушки без экрана

$$a_2 = d'_2 n_{\text{сл}2} + \delta_{\text{мсл}} (n_{\text{сл}2} - 1) + a'_{22}. \quad (6-42)$$

В обмотках класса напряжения 35 кВ под внутренним слоем обмотки устанавливается металлический экран — незамкнутый цилиндр из латунного листа толщиной 0,5 мм. Экран соединяется электрически с линейным концом обмотки (начало внутреннего слоя) и изолируется от внутреннего слоя обмотки обычно междуслойной изоляцией или листом картона толщиной 0,1 см. Такая же изоляция экрана устанавливается со стороны масляного канала.

При наличии экрана радиальный размер обмотки определяется по формуле

$$a'_2 = a_2 + \delta_{\text{экр}} + 2\delta_{\text{мсл}}, \quad (6-43)$$

где a_2 определяется по (6-41) или (6-42); $\delta_{\text{экр}} = 0,05$ см; $\delta_{\text{мсл}}$ по табл. 4-7.

Для рабочего напряжения 35 кВ можно принять дополнительное увеличение радиального размера обмотки

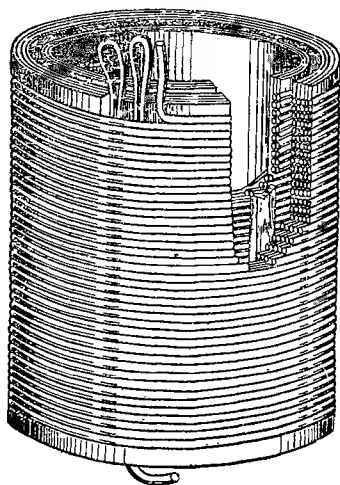


Рис. 6-10. Многослойная цилиндрическая обмотка из круглого провода.

за счет экрана и двух слоев междуслойной изоляции на 0,3 см.

Минимальный радиальный размер a_{12} осевого канала между обмотками НН и ВН и толщина изоляционного цилиндра выбираются по испытательному напряжению обмотки ВН согласно § 4-5 для масляных и § 4-6 для сухих трансформаторов.

В обмотках с экраном радиальный размер a'_2 , определенный по (6-43), принимается в расчет только при определении размеров обмотки. При подсчете э. д. с. рассеяния для этих обмоток следует в расчет вводить размер a_2 , определенный по (6-41) или (6-42), и соответственно увеличивать расчетную ширину масляного канала между обмотками, т. е. брать:

$$a'_{12} = a_{12} + \delta_{\text{экр}} + 2\delta_{\text{мсл}}. \quad (6-44)$$

Внутренний диаметр обмотки (при наличии экрана — до его внутренней изоляции), см,

$$D'_2 = D'_1 + 2a_{12}. \quad (6-45)$$

Наружный диаметр обмотки:
без экрана

$$D''_2 = D'_2 + 2a_2; \quad (6-46)$$

с экраном

$$D''_2 = D'_2 + 2a'_2. \quad (6-47)$$

Расстояние между обмотками ВН соседних стержней выбирается согласно указаниям § 4-5 или 4-6.

Поверхность охлаждения, м^2 , определяется по формуле

$$P_{02} = \pi n k l (D'_2 + D''_2) l_2 \cdot 10^{-4}. \quad (6-48)$$

Для одной катушки, намотанной непосредственно на цилиндр, по рис. 5-26, а $n=1,0$; $D'_2=0$; $k=1,0$.

Для одной катушки по рис. 5-26, б $n=1,0$; $k=0,88$.

Для двух катушек по рис. 5-26, в $n=1,5$; $k=0,83$ и по рис. 5-26, д $n=2$; $k=0,8$.

Здесь s — число стержней магнитной системы.

Коэффициент k в (6-48) учитывает закрытые части поверхностей обмотки изоляционными деталями и число

внутренних и наружных поверхностей. Для внутренних поверхностей $k=0,75$. Для наружной поверхности при свободном доступе охлаждающего масла $k=1,0$. В случае применения этого типа обмотки на стороне НН (внутренняя обмотка рис. 5-26, в) в (6-48) надлежит принимать $k=0,75$; $n=2$.

Расчет многослойной цилиндрической обмотки из прямоугольного провода

Этот тип обмотки (рис. 6-11) может применяться в качестве обмотки ВН (в некоторых случаях НН) в масляных трансформаторах классов напряжения 10

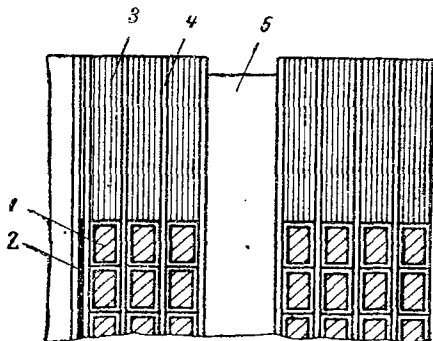


Рис. 6-11. Разрез торцевой части многослойной цилиндрической обмотки из прямоугольного провода.

1 — провод обмотки; 2 — электростатический экран; 3 — бумажно-бакелитовое опорное кольцо; 4 — междуслойная изоляция из кабельной бумаги; 5 — рейка из электроизоляционного картона.

и 35 кВ мощностью от 1000 кВ·А и более. После определения l_2 , Π_2 и Δ_2 необходимо выбрать один или два-три параллельных провода с общим сечением Π_2 так, чтобы плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности обмотки q не превысила предельно допустимое значение $q=1400 \div 1500$ Вт/м² и добавочные потери не вышли за принятый уровень (от 5 до 20%).

Общий суммарный радиальный размер проводов, см, необходимый для получения полного сечения всех витков обмотки, для обмотки ВН

$$b = \frac{w_2 \Pi_2}{l_2 k_{oc}}, \quad (6-49)$$

где k_{oc} — средний коэффициент, учитывающий изоляцию проводов в осевом направлении обмотки, который может быть принят $k_{oc}=0,92$ для медного и $k_{oc}=0,93$ для алю-

миниевого провода. Для обмотки НН в (6-49) подставляется число витков w_1 .

Если найденный суммарный размер b окажется больше размера, допустимого по плотности теплового потока по графикам рис. 5-38 или по формулам (5-6) или (5-7), то обмотку следует разделить на две или три концентрические катушки так, чтобы у каждой из них суммарный размер был не больше допустимого. Ширина каждого осевого канала между катушками должна быть равна $0,01 l_2$, но не менее 0,5 см. При расчете по формулам (5-6) или (5-7) или при пользовании графиками рис. 5-38 для обмотки ВН следует принимать $k_3=0,8$ и для обмотки НН $k_3=0,75$.

Радиальный размер провода a и число слоев обмотки $n_{сл2}$ должны быть выбраны при помощи табл. 5-9 так, чтобы добавочные потери в обмотке не вышли за принятый уровень. Например, при алюминиевом проводе, добавочных потерях до 5% и суммарном радиальном размере проводов $b=3,0$ см при числе слоев от одного до шести размер провода $a=b/n_{сл2}$ от $3,0/1=3,0$ до $3,0/6=0,5$ см будет большим, чем это допустимо по принятому уровню добавочных потерь. Можно выбрать число слоев от 7 до 10 при размере провода от 0,43 до 0,30 см.

Реальные сечения проводов подбираются по табл. 5-2 или 5-3 и записываются так:

$$\text{Марка провода} \times \text{Число проводов} \times \frac{\text{Размеры провода без изоляции}}{\text{Размеры провода в изоляции}},$$

или

$$\text{Марка провода} \times n_{в2} \times \frac{a \times b}{a' \times b'}.$$

Полиное сечение витка, мм²,

$$P_2 = n_{в2} P'_2. \quad (6-50)$$

Полученная плотность тока, А/мм²,

$$\Delta_2 = \frac{I_2}{P_2}. \quad (6-51)$$

Число витков в слое

$$w_{сл2} = \frac{l_2}{n_{в2} b'} - 1 \quad (6-52)$$

$$n_{\text{сл}2} = \omega_2 / \omega_{\text{сл}2} \quad (6-53)$$

($n_{\text{сл}2}$ округляется до ближайшего большего числа).

Рабочее напряжение двух слоев, В,

$$U_{\text{мсл}} = 2\omega_{\text{сл}2} u_{\text{в}}. \quad (6-54)$$

По рабочему напряжению двух слоев по табл. 4-7 в соответствии с указаниями § 4-5 выбирается число слоев и общая толщина $\delta_{\text{мсл}}$ кабельной бумаги в изоляции между двумя слоями обмотки.

В обмотках класса напряжения 35 кВ под внутренним слоем обмотки устанавливается металлический экран — незамкнутый цилиндр из листа немагнитного металла толщиной 0,5 мм. Экран соединяется электрически с линейным концом обмотки (начало внутреннего слоя) и изолируется от внутреннего слоя обмотки обычной междуслойной изоляцией. Такая же изоляция экрана устанавливается со стороны масляного канала.

Радиальный размер обмотки без экрана, см,

$$a_2 = a' n_{\text{сл}2} + \delta_{\text{мсл}} (n_{\text{сл}2} - 1) + a'_{22} n_{\text{к}}, \quad (6-55)$$

где a'_{22} — радиальный размер канала, см; $n_{\text{к}}$ — число осевых каналов.

Радиальный размер обмотки с экраном, см,

$$a'_2 = a_2 + 0,3, \quad (6-56)$$

где для класса напряжения 35 кВ принято увеличение радиального размера обмотки за счет экрана и двух слоев междуслойной изоляции на 0,3 см.

Минимальный радиальный размер a_{12} осевого канала между обмотками НН и ВН и толщина изоляционного цилиндра выбираются по испытательному напряжению обмотки ВН и мощности трансформатора согласно § 4-5 для масляных трансформаторов.

В обмотках с экраном радиальный размер a'_2 , определенный по (6-56), принимается в расчет только при определении размеров обмотки. При подсчете э. д. с. рассеяния для этих обмоток следует в расчет вводить размер a_2 , определенный по (6-55) и соответственно увеличивать ширину масляного канала между обмотками, т. е.

$$a'_{12} = a_{12} + 0,3, \text{ см.} \quad (6-57)$$

Внутренний диаметр обмотки (при наличии экрана — до его внутренней изоляции), см,

$$D'_2 = D'_1 + 2a_{12}. \quad (6-58)$$

Наружный диаметр обмотки, см:
без экрана

$$D''_2 = D'_2 + 2a_2; \quad (6-59)$$

с экраном

$$D''_2 = D'_2 + 2a'_2. \quad (6-60)$$

Расстояние между обмотками соседних стержней выбирается согласно указаниям § 4-5.

Схема расположения регулировочных ответвлений принимается по рис. 6-6, б.

Поверхность охлаждения, м², определяется по формуле

$$P_{oz} = cnk\pi (D'_2 + D''_2) l_2 \cdot 10^{-4}. \quad (6-61)$$

Для обмотки ВН из двух катушек $n=2$; $k=0,8$. Для такой же обмотки НН $n=2$; $k=0,75$.

Расчет непрерывной катушечной обмотки (рис. 6-12)

Ориентировочное сечение витка находится по (6-34). К этому сечению витка по сортаменту обмоточного провода (табл. 5-2 и 5-3) подбираются подходящие сечения прямоугольного провода — одно или два-четыре одинаковых сечения. Больший размер провода b при этом не должен превосходить предельный размер, найденный по допустимому значению q по (7-18) и (7-18') или кривой на рис. 5-38. Выбранные размеры записываются так:

Марка провода \times Число параллельных проводов \times

$$\times \frac{\text{Размеры провода без изоляции}}{\text{Размеры провода в изоляции}}$$

т. е.

$$\text{Марка провода} \times n_{в2} \times \frac{a \times b}{a' \times b'}.$$

Принятое сечение провода P'_2 , мм².

Полное сечение витка, мм²,

$$\Pi_2 = n_{в2} \Pi'_2.$$

Плотность тока, А/мм²,

$$\Delta_2 = I_2 / \Pi_2. \quad (6-62)$$

Высота катушки $h_{кат}$ в этой обмотке равна большему размеру провода в изоляции b' .

Число катушек на одном стержне ориентировочно определяется по формулам:

для случая, когда каналы сделаны между всеми катушками,

$$n_{кат2} = \frac{l_2 + h_k}{b' + h_k}; \quad (6-63)$$

для сдвоенных катушек с шайбами в двойных и с каналами между двойными катушками

$$n_{кат2} = \frac{2(l_2 + h_k)}{2b' + h_k + \delta_{ш}}. \quad (6-64)$$

Число витков в катушке ориентировочно

$$w_{кат2} \approx \frac{w_2}{n_{кат2}}. \quad (6-65)$$

Осевой размер (высота) канала h_k в трансформаторах мощностью S от 160 до 6300 кВ·А и рабочим напряжением не более 35 кВ колеблется от 0,4 до 0,6 см; в сухих трансформаторах — от 1,0 до 2,0 см. В двойных катушках, если в них не делается канал, прокладываются шайбы толщиной 0,05 см по две шайбы на двойную катушку. В трансформаторах большей мощности и при напряжениях 110 и 220 кВ высота канала может быть выбрана до 1,2—1,5 см. Размер канала h_k во всех случаях выбирается по изоля-

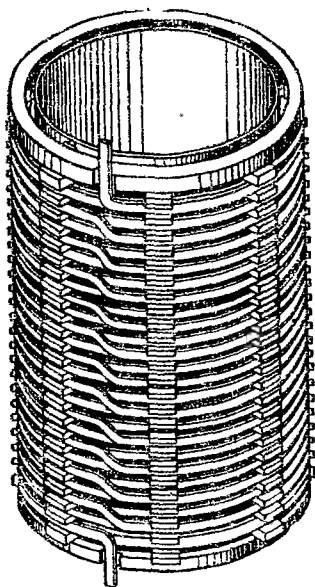


Рис. 6-12. Непрерывная катушечная обмотка.

ционными соображениям согласно указаниям § 4-5 и проверяется по табл. 9-2 минимальных размеров, масляных и воздушных охлаждающих каналов.

Обычно нужному сечению витка Π_2 в сортаменте обмоточного провода соответствует несколько сечений провода с различным соотношением сторон b/a , что дает возможность широкого варьирования при размещении витков в катушке. Для получения более компактной конструкции обмотки рекомендуется выбирать из сортамента более крупные сечения при меньшем числе параллельных проводов и сечения с большим возможным размером b . При этом должны соблюдаться следующие требования:

1) общая высота (осевой размер) обмотки l_2 после сушки и опрессовки должна совпадать с высотой обмотки НН l_1 ;

2) регулировочные витки и витки с усиленной изоляцией должны быть уложены в отдельные катушки;

3) общее количество катушек должно быть четным, число различных видов катушек не более четырех;

4) число витков в катушке может быть целым или дробным; в последнем случае знаменателем дроби должно быть число реек по окружности обмотки.

Для обмотки с каналами между всеми катушками высота l_2 , см,

$$l_2 = b' n_{\text{кат}2} + k [h_k (n_{\text{кат}2} - 2) + h_{\text{кр}}]. \quad (6-66)$$

Для обмотки с шайбами в двойных и с каналами между двойными катушками

$$l_2 = b' n_{\text{кат}2} + k \left[h_k \left(\frac{n_{\text{кат}2}}{2} - 2 \right) + h_{\text{кр}} + \frac{n_{\text{кат}2}}{2} \delta_{\text{ш}} \right]. \quad (6-67)$$

Высота канала в месте разрыва обмотки и размещения регулировочных витков $h_{\text{кр}}$ выбирается по изоляционным соображениям согласно указаниям § 4-5. Коэффициент k , учитывающий усадку изоляции после сушки и опрессовки обмотки, равен $k=0,94 \div 0,96$ (в отдельных случаях до 0,90).

Радиальный размер обмотки, см,

$$a_2 = a' \omega_{\text{кат}}, \quad (6-68)$$

где $\omega_{\text{кат}}$ — число витков катушки, дополненное до ближайшего большего целого числа.

Расстояние между обмотками ВН соседних стержней a_{22} выбирается согласно указаниям § 4-5 или 4-6.

Внутренний и наружный диаметры обмотки определяются по (6-58) и (6-59). Плотность теплового потока на поверхности обмотки q определяется по формулам (7-19) — (7-19''').

6-4. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА. РАСЧЕТ ОБМОТОК

Трансформатор ТМ-1600/35. Вариант I_M — медные обмотки
(продолжение примера расчета § 3-6)

Расчет обмотки НН (по § 6-1). Число витков обмотки НН $w_1 = U_{\phi 1}/u_v = 399/19,07 = 20,92$, принимаем $w_1 = 21$ виток; э. д. с. одного витка $u_v = 399/21 = 19,0$ В.

Средняя плотность тока в обмотках по (5-4)

$$\Delta_{cp} = 0,746 k_d \frac{P_K u_v}{S d_{12}} = 0,746 \cdot 0,91 \frac{18\,000 \cdot 19,0}{1600 \cdot 39,24} = 3,698 = 3,7 \text{ А/мм}^2.$$

Сечение витка предварительно

$$P'_1 = \frac{I_{\phi 1}}{\Delta_{cp}} = \frac{1339}{3,7} = 362 \text{ мм}^2.$$

По табл. 5-8 по мощности 1600 кВ·А, току на один стержень 1339 А, номинальному напряжению обмотки 690 В и сечению витка 362 мм² выбираем конструкцию винтовой обмотки. Размер радиального канала предварительно $h_k = 0,5$ см. Согласно § 5-2 число реек по окружности обмотки 12, ширина междувитковых прокладок $b_{пр} = 4,0$ см.

Ориентировочный осевой размер витка

$$h_{в1} = \frac{l}{w_1 + 4} - h_k = \frac{55,5}{21 + 4} - 0,5 = 1,72 \text{ см.}$$

Ввиду того что $h_{в1} > 1,5$ см и по графикам рис. 5-38, а при максимальном размере медного провода $b = 1,5$ см и плотности тока $\Delta = 3,7$ А/мм² плотность теплового потока $q = 2000$ Вт/м², что при естественном масляном охлаждении не допускается, выбираем двухходовую винтовую обмотку с радиальными каналами в витках и между витками, с равномерно распределенной транспозицией.

По полученным ориентировочным значениям P_1 и $h_{в1}$ по табл. 5-2 подбираем сечение витка из 12 параллельных проводов ПБ $\times 12 \times \frac{4,50 \times 7,10}{5,00 \times 7,60}$, разделенных на две группы (рис. 6-13). Полное сечение витка

$$P_1 = 12 \times 31,1 = 373,2 \text{ мм}^2,$$

плотность тока

$$\Delta_1 = \frac{I_{\phi 1}}{P_1} = \frac{1339}{373,2} = 3,588 = 3,59 \text{ А/мм}^2.$$

По графикам рис. 5-38, а для $\Delta = 3,59$ А/мм² и $b = 0,71$ находим $q = 1000$ Вт/м².

Принимаем в витках и между витками 39 радиальных каналов по 0,5 см; в середине высоты обмотки 4 канала по 1,0 см.

Полная высота обмотки с учетом опрессовки прокладок после сушки

$$l_1 = 2b' (w_1 + 1) + k [(2w_1 - 3) h_{k1} + 4h_{k2}] = \\ = 2 \cdot 0,76 (21 + 1) + 0,95 [(2 \cdot 21 - 3) 0,5 + 4 \cdot 1,0] = 55,7 \text{ см.}$$

Радиальный размер обмотки

$$a_1 = \frac{n_{в1}}{2} a' = \frac{12}{2} 0,50 = 3,00 \text{ см.}$$

По табл. 4-4 для $U_{исп} = 5$ кВ, $S = 1600$ кВ·А и винтовой обмотки находим $a_{01} = 1,5$ см. Обмотка наматывается на 12 рейках на бумажно-бакелитовом цилиндре с размерами $\varnothing 29/29,8 \times 66,5$ см.

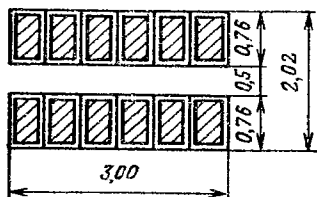
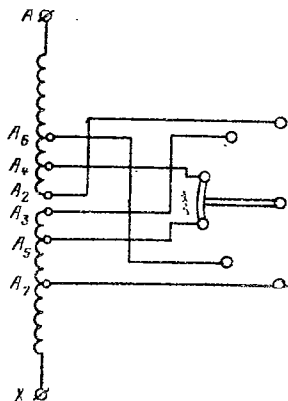


Рис. 6-13. Сечение витка обмотки НН из медного провода (вариант I).

Рис. 6-14. Схема регулирования напряжения ВН (вариант I, обмотка из медного провода).



Внутренний диаметр обмотки

$$D'_1 = d + 2a_{01} = 28 + 2 \cdot 1,5 = 31 \text{ см.}$$

Наружный диаметр обмотки

$$D''_1 = D'_1 + 2a_1 = 31 + 2 \cdot 3,00 = 37,0 \text{ см.}$$

Плотность теплового потока на поверхности обмотки по (7-19)

$$q_1 = \frac{1,07 \Delta l w_k k_d}{k_3 (b' + a_1)} = \frac{1,07 \cdot 3,59 \cdot 1339 \cdot 0,5 \cdot 1,05}{0,75 (0,76 + 3,00)} = 958 \text{ Вт/м}^2.$$

В двухходовой обмотке предусматривается равномерно распределенная транспозиция — 12 транспозиций по принципиальной схеме рис. 5-33. Первую транспозицию сделать после 10/12 витка от начала обмотки и 11 последующих с шагом $1^{9/12}$ витка.

Масса металла обмотки по (7-6)

$$G_{01} = 28cD_{cp} w_1 \Pi_1 \cdot 10^{-5} = 28 \cdot 3 \cdot 34 \cdot 21 \cdot 373,2 \cdot 10^{-5} = 223,8 \text{ кг.}$$

Масса провода по табл. 5-5

$$G_{пр1} = 1,02 \cdot 223,8 = 228,3 \text{ кг.}$$

Расчет обмоток ВН (по § 6-3). Выбираем схему регулирования по рис. 6-14 с выводом концов всех трех фаз обмотки к одному трех-фазному переключателю. Контакты переключателя рассчитываются на рабочий ток 26,4 А. Наибольшее напряжение между контактами переключателя в одной фазе:

$$\text{Рабочее ... } 10 \sqrt{3} \% U_2, \text{ т. е. } 2020 \text{ В}$$

$$\text{Испытательное ... } 2 \cdot 10 \sqrt{3} \% U_2, \text{ т. е. } 4040 \text{ В}$$

Для получения на стороне ВН различных напряжений необходимо соединить:

Напряжение, В	Ответвления обмотки		
36 750	$A_2 A_3$	$B_2 B_3$	$C_2 C_3$
35 875	$A_3 A_4$	$B_3 B_4$	$C_3 C_4$
35 000	$A_4 A_5$	$B_4 B_5$	$C_4 C_5$
34 125	$A_5 A_6$	$B_5 B_6$	$C_5 C_6$
33 250	$A_6 A_7$	$B_6 B_7$	$C_6 C_7$

Число битков в обмотке ВН при номинальном напряжении

$$w_{н2} = w_1 \frac{U_{\phi 2}}{U_{\phi 1}} = 21 \frac{20\,207}{399} = 1064.$$

Число витков на одной ступени регулирования

$$w_p = \frac{\Delta U}{\sqrt{3} u_B} = \frac{875}{\sqrt{3} \cdot 19,0} = 27.$$

Число витков на ответвлениях:

Напряжение, В

ступень 36 750	w_2	{	$= 1064 + 2 \cdot 27 = 1118$
ступень 35 875			$= 1064 + 27 = 1091$
ступень 35 000			$= 1064$
ступень 34 125			$= 1064 - 27 = 1037$
ступень 33 250			$= 1064 - 2 \cdot 27 = 1010$

Ориентировочная плотность тока

$$\Delta'_2 = 2\Delta_{cp} - \Delta_1 = 2 \cdot 3,7 - 3,59 = 3,81 \text{ А/мм}^2.$$

Ориентировочное сечение витка

$$\Pi'_2 = \frac{I_{\phi 2}}{\Delta'_2} = \frac{26,4}{3,81} = 6,92 \text{ мм}^2.$$

По табл. 5-8 выбираем непрерывную катушечную обмотку ($S = 1600 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $I_2 = 26,4 \text{ А}$, $U_{н2} = 35\,000 \text{ В}$, $P_2' = 6,92 \text{ мм}^2$). По сортаменту медного обмоточного провода (табл. 5-2) выбираем провод марки ПБ:

$$\text{ПБ} \times 1 \times \frac{1,50 \times 5,00}{2,00 \times 5,50} \text{ с сечением } P_2 = 7,29 \text{ мм}^2.$$

В двух верхних и двух нижних катушках обмотки каждой фазы применяется провод того же размера с усиленной изоляцией 1,35 (1,50) с размерами в изоляции $3,00 \times 6,50$ (табл. 4-10).

Плотность тока

$$\Delta_2 = \frac{26,4}{7,29} = 3,62 \text{ А/мм}^2.$$

При $\Delta = 3,62 \text{ А/мм}^2$ и $b = 0,50 \text{ см}$ по графикам рис. 5-38, а находим $q = 700 \text{ Вт/м}^2$. Это значение q получено для катушек, имеющих четыре охлаждаемые маслом поверхности. Для вдвоенных катушек q увеличится примерно в 1,5 раза. Принимаем конструкцию обмотки со вдвоенными катушками. В вдвоенных катушках две шайбы по 0,05 см. Между двойными катушками (основными и регулировочными) каналы по 0,5 см. Две крайние катушки внизу и вверху отделены каналами по 0,75 см (табл. 4-10). Схема регулирования по рис. 6-14; канал в месте разрыва обмотки $h_{кр} = 1,25 \text{ см}$ (табл. 4-9). Осевой размер катушки $b' = 0,55 \text{ см}$.

Число катушек на одном стержне ориентировочное по (6 64)

$$n_{\text{кат}2} = \frac{2(l_2 + h_k)}{2b' + h_k + \delta_{ш}} = \frac{2(55,5 + 0,5)}{2 \cdot 0,55 + 0,50 + 0,1} = 66.$$

Поскольку необходимо сделать несколько увеличенных каналов, принимаем 64 катушки. Число витков в катушке ориентировочно

$$w'_{\text{кат}2} = \frac{w_2}{n_{\text{кат}2}} = \frac{1118}{64} = 17,5.$$

Общее распределение витков между катушками:

52 основные катушки В по 18,5 витков	962
4 катушки с усиленной изоляцией Г по 12 витков	48
8 регулировочных катушек Д по 13,5 витков	108

Всего 64 катушки 1118

Расположение катушек на стержне и размеры радиальных каналов приняты по рис. 6-15, а. Данные катушек приведены в табл. 6-1. Осевой размер обмотки

$$l_2 = \Sigma h_{\text{кат}} + k \Sigma h_k = 0,55 \cdot 60 + 0,65 \cdot 4 + 0,95 (0,75 \cdot 4 + 1,25 + 0,1 \cdot 30 + 0,5 \cdot 28) = 55,8 \approx 55,5 \text{ см}.$$

Данные катушек обмотки ВН трансформатора
ТМ-1600/35. Вариант I_М — медные обмотки

Наименование данных	Условное обозначение катушки			
	В	Г	Д	Всего
Назначение катушки	Основ- ная	Регулировоч- ная	С усиленной изоляцией	—
Катушек на стержень	52	8	4	64
Направление намотки	Левое	Левое	Левое	Левое
Число витков в ка- тушке	18,5	13,5	12	—
Всего витков	962	108	48	1118
Размеры провода, мм: без изоляции с изоляцией	1,50×5,00	1,50×5,00	1,50×5,00	—
	2,00×5,50	2,00×5,50	3,00×6,50	—
Сечение витка, мм ²	7,29	7,29	7,29	7,29
Плотность тока, А/мм ²	3,62	3,62	3,62	3,62
Размер, см: радиальный осевой	3,7 0,55	3,7 (2,7)* 0,55	3,6 0,65	3,7 —
Масса провода, кг: без изоляции с изоляцией	271,6 281,1	30,5 31,6	13,5 15,2	315,6 327,9
По табл. 5-5	+3,5%	+3,5%	+12,25%	—
Диаметры, см: внутренний наружный	42,4 49,8	42,4 49,8	42,4 49,6	42,4 49,8

* В катушку Г вмотать картон до размера 3,7 см.

По испытательному напряжению $U_{исп}=85$ кВ и мощности трансформатора $S=1600$ кВ·А по табл. 4-5 находим:

Капал между обмотками ВН и НН	$a_{12}=2,7$ см
Толщина цилиндра	$\delta_{12}=0,5$ см
Выступ цилиндра за высоту обмотки	$l_{12}=5,5$ см
Между обмотками ВН двух соседних стержней	$a_{22}=3,0$ см
Толщина междуфазной перегородки	$\delta_{22}=0,3$ см
Расстояние обмотки ВН до ярма	$l_{02}=7,5$ см

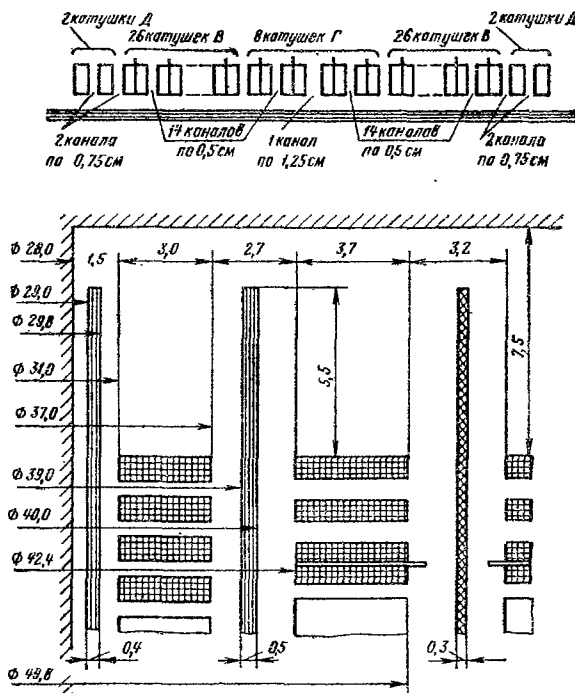


Рис. 6-15. Обмотки трансформатора ТМ-1600/35. Вариант I_м.

a — расположение катушек и радиальных каналов; *б* — основные размеры обмотки. Размеры в сантиметрах.

Согласно § 4-3 принимаем размеры бумажно-бакелитового цилиндра $\varnothing 39/40 \times 66,5$ см. Основные размеры обмоток трансформатора показаны на рис. 6-15, б.

Плотность теплового потока на поверхности обмотки по § 7-1 при $k_d \approx 1,05$ (для катушек В)

$$q_2 = \frac{2,14 \Delta t w_k k_d}{k_3 (2b' + a_2)} = \frac{2,14 \cdot 3,62 \cdot 26,4 \cdot 19 \cdot 1,05}{0,75 \cdot (2 \cdot 0,55 + 3,7)} = 1134 \text{ Вт/м}^2.$$

Масса металла обмотки по табл. 6-1 $G_{02}=315,6$ кг.

Масса провода с изоляцией $G_{пр2}=327,9$ кг.

Масса металла (меди) двух обмоток

$$G_0 = 223,8 + 315,6 = 539,4 \text{ кг.}$$

Масса провода двух обмоток (с изоляцией)

$$G_{пр} = 228,3 + 327,9 = 556,2 \text{ кг.}$$

Трансформатор ТМ-1600/35. Вариант II — алюминиевые обмотки
(продолжение расчета § 3-6)

Расчет обмотки НН (по § 6-1). Число витков $w_1=399/16,08=$
 $=24,8 \approx 25$ витков; э. д. с. одного витка $u_1=399/25=15,96$ В.

Средняя плотность тока по (3-49')

$$A_{ср} = 0,463 \cdot 0,91 \frac{16 \cdot 200 \cdot 15,96}{1600 \cdot 39,13} = 1,752 \text{ А/мм}^2.$$

Сечение витка ориентировочно

$$P'_1 = \frac{1339}{1,752} = 764,3 \text{ мм}^2.$$

По табл. 5-8 согласно указаниям § 5-5 и 6-1 по мощности 1600 кВ·А, току обмотки одного стержня 1339 А, сечению витка 764,3 мм² и плотности тока 1,752 А/мм² выбираем винтовую обмотку без радиальных каналов с плотным прилеганием витков. По (5-7) находим максимальный суммарный радиальный размер проводов обмотки без осевого канала:

$$b = \frac{1500 \cdot 0,8}{172 \cdot 1,752^2} = 2,28 \text{ см.}$$

При таком суммарном радиальном размере и высоте обмотки 90 см не может быть обеспечено необходимое суммарное сечение 25 витков обмотки по 764,3 мм² в каждом витке. Выбираем конструкцию четырехходовой двухслойной обмотки из прямоугольного провода, без радиальных каналов с плотным прилеганием витков, с последовательным соединением слоев и равномерно распределенной транспозицией в каждой паре ходов. Число реек по окружности обмотки 12.

Число витков в слое

$$w_{сл} = \frac{25}{2} = 12,5.$$

Начала и концы двух пар ходов сдвинуть по окружности обмотки на 180°, что даст возможность рассчитать высоту обмотки по числу витков в слое $12,5+0,5=13$ витков. Ориентировочная высота витка

$$h_{в1} = \frac{90}{13} = 6,93 \text{ см.}$$

По ориентировочным значениям Π_1^* и $h_{в1}$ по табл. 5-3 подбираем сечение витка из 16 параллельных проводов в четырех ходах:

$$\text{АПБ} \times 4 \text{ хода} \times 4 \times \frac{2,83 \times 16,8}{3,33 \times 17,3} \text{ мм}; \quad \Pi_1 = 47,0 \times 16 = 752 \text{ мм}^2.$$

Сечение витка из четырех групп проводов показано на рис. 6-17. Плотность тока

$$\Delta_1 = \frac{1339}{752} = 1,781 \approx 1,78 \text{ А/мм}^2.$$

Высота обмотки $l_1 = 4 \cdot 1,73 (12,5 + 0,5) = 89,96 \approx 90 \text{ см.}$

Между двумя слоями обмотки осевой масляный канал шириной не менее $a_{11} = 0,01 l_1 = 0,01 \cdot 90 = 0,9 \approx 1,0 \text{ см.}$

Радиальный размер обмотки

$$a_1 = 0,333 \cdot 4 \cdot 2 + 1,0 = 3,67 \approx 3,7 \text{ см.}$$

Обмотка наматывается на бумажно-бакелитовом цилиндре $\varnothing 27/27,8 \times 101 \text{ см.}$

Внутренний диаметр обмотки $D_1' = 26 + 2 \cdot 1,5 = 29 \text{ см.}$

Наружный диаметр обмотки $D_1'' = 29 + 2 \cdot 3,7 = 36,4 \text{ см.}$

Плотность теплового потока на поверхности обмотки по (7-17') и рис. 7-3, а при $b = 4 \cdot 0,283$

$$q_1 = \frac{172}{k_s} b \frac{a}{a'} \Delta^2 k_d = \frac{172}{0,8} (4 \cdot 0,283) \frac{1,68}{1,73} 1,78^2 \cdot 1,05 = 786 \text{ Вт/м}^2.$$

Радиальный размер провода 0,283 см при восьми проводах обмотки в радиальном направлении меньше предельного размера 0,41 см по табл. 5-9 при добавочных потерях до 5%.

В каждой паре ходов каждого слоя предусматривается равномерно распределенная транспозиция — 12 транспозиций по принципиальной схеме рис. 5-33. Первую транспозицию сделать после 9/12 витка от начала слоя, одиннадцать последующих с шагом в один виток.

Масса металла обмотки по (7-7)

$$G_{01} = 8,47 \cdot 3 \cdot 32,7 \cdot 25 \cdot 752 \cdot 10^{-5} = 156,2 \text{ кг.}$$

Масса провода в изоляции по табл. 5-5

$$G_{пр1} = (1 + 0,02 \cdot 3,3) \cdot 156,2 = 166,5 \text{ кг.}$$

После намотки и сушки обмотку опрессовать осевой силой 25 000 Н.

Расчет обмотки ВН (по § 5-3 и 6-3). Схема регулирования напряжения в нейтрали по рис. 6-6, б. Расположение регулировочных витков и схема переключателя по рис. 6-16. Число витков обмотки ВН при номинальном напряжении

$$w_{н2} = 25 \frac{20207}{399} = 1266.$$

Число витков на одной ступени регулирования

$$w_p = \frac{875}{\sqrt{3 \cdot 15,96}} = 31,7 \approx 32.$$

Число витков на ответвлениях

Напряжение, В

ступень 36 750	$w_2 \left\{ \begin{array}{l} = 1266 + 2 \cdot 32 = 1330 \\ = 1266 + 32 = 1298 \\ = 1266 \\ = 1266 - 32 = 1234 \\ = 1266 - 2 \cdot 32 = 1202 \end{array} \right.$
ступень 35 875	
ступень 35 000	
ступень 34 125	
ступень 33 250	

Ориентировочная плотность тока

$$\Delta'_2 = 2 \cdot 1,752 - 1,78 = 1,724 \text{ А/мм}^2.$$

Ориентировочное сечение витка

$$P'_2 = \frac{26,4}{1,724} \approx 15,3 \text{ мм}^2.$$

Суммарный радиальный размер проводов, необходимый для получения общего сечения витков обмотки по (6-49):

$$b = \frac{w_2 P_2}{l_2 k_{oc}} = \frac{1330 \cdot 15,3 \cdot 10^{-2}}{90 \cdot 0,93} = 2,43 \text{ см.}$$

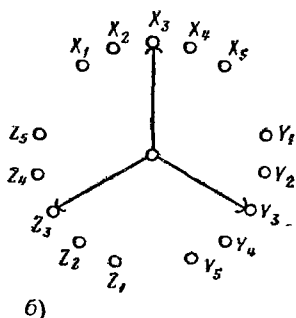
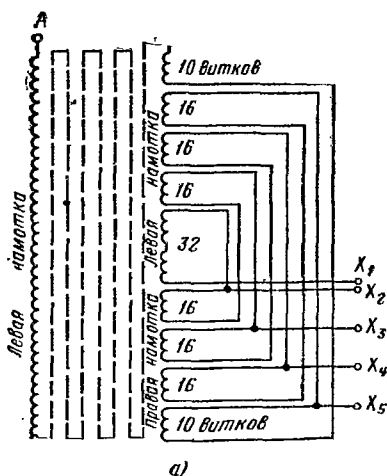


Рис. 6-16. Обмотка ВН трансформатора ТМ-1600/35. Вариант ПД.

а — расположение витков в слоях обмотки и схема вывода ответвлений;
б — схема переключателя ответвлений.

По (5-7) находим наибольший суммарный радиальный размер металла проводов обмотки для допустимой $q=1500$ Вт/м²:

$$b_q = \frac{qk_3}{172\Delta^2} = \frac{1500 \cdot 0,8}{172 \cdot 1,724^2} = 2,35 \text{ см.}$$

Ввиду того, что $b > b_q$, обмотку следует выполнить с одним осевым каналом шириной $a_{22} \geq 0,01 l_2$, или $a_{22} \geq 0,9$ см. Радиальный размер провода согласно табл. 5-9 и табл. 5-3 может быть выбран в пределах от шести проводов с размером 0,47 до десяти проводов с размером 0,38 мм.

Выбираем провод

$$\text{АПБ} \times 1 \times \frac{3,05 \times 5,5}{3,55 \times 6,0},$$

с сечением $P_2 = 16,3$ мм².

Плотность тока

$$\Delta_2 = \frac{26,4}{16,3} = 1,62 \text{ А/мм}^2,$$

Число витков в одном слое

$$w_{\text{сл}2} = \frac{90}{0,6} - 1 = 149.$$

Число слоев

$$n_{\text{сл}2} = \frac{1330}{149} = 8,93 \approx 9.$$

Радиальный размер провода 0,305 см при девяти слоях в обмотке меньше максимально допустимого размера 0,38 см по табл. 5-9, при котором добавочные потери не выходят за уровень 5%.

Обмотка разделяется на две катушки — внутреннюю B с четырьмя слоями и наружную Γ с пятью слоями. Между катушками B и Γ осевой масляный канал шириной 1 см. Под внутренним слоем обмотки располагается электрический экран — алюминиевый незамкнутый цилиндр с толщиной 0,5 мм, электрически соединенный с линейным концом обмотки A (на двух других фазах с B и C).

Напряжение двух слоев обмотки

$$U_{\text{мсл}} = 2 \cdot 149 \cdot 15,96 = 4750 \text{ В.}$$

Междуслойная изоляция по табл. 4-7 — 8 слоев кабельной бумаги по 0,12 мм, выступ изоляции на торцах обмотки 2,2 см на одну сторону.

Радиальный размер обмотки без экрана

$$a_2 = 0,355 \cdot 9 + 8 \cdot 0,012 \cdot 8 + 1,0 = 4,968 \approx 5,0 \text{ см.}$$

Радиальный размер обмотки с экраном

$$a'_2 = 5,0 + 0,30 = 5,30 \text{ см.}$$

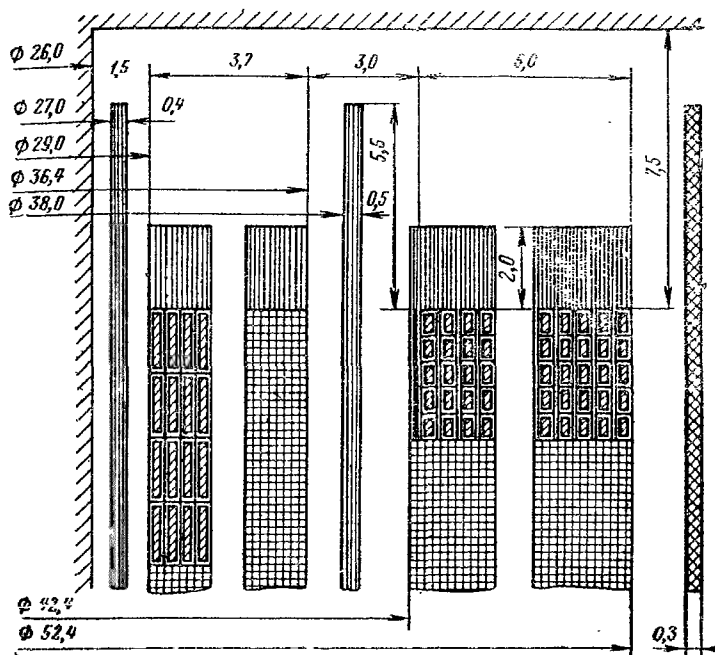


Рис. 6-17. Основные размеры (см) обмоток трансформатора ТМ-1600/35. Вариант II_A.

Расчетный размер канала между обмотками НН и ВН (для расчета u_p)

$$a'_{12} = 2,7 + 0,3 = 3,0 \text{ см.}$$

Внутренний диаметр обмотки (для расчета массы провода) по внутреннему слою проводов

$$D'_2 = 36,4 + 2 \cdot 3,0 = 42,4 \text{ см.}$$

Наружный диаметр обмотки

$$D_2 = 42,4 + 2 \cdot 5,0 = 52,4 \text{ см.}$$

По испытательному напряжению обмотки $U_{исп} = 85 \text{ кВ}$ по табл. 4-5 находим:

$$a_{12} = 3,0 \text{ см; } \delta_{12} = 0,5 \text{ см; } l_{12} = 5,5 \text{ см;}$$

$$a_{22} = 3,0 \text{ см; } \delta_{22} = 0,3 \text{ см; } l_{02} = 7,5 \text{ см.}$$

Согласно § 4-3 принимаем размеры бумажно-бакелитового цилиндра $\varnothing 38/39 \times 101$ см. Поверхность охлаждения обмотки по (6-61):

$$P_{O2} = 3 \cdot 2 \cdot 0,8 \pi (42,4 + 52,4) \cdot 90 \cdot 10^{-4} = 12,87 \text{ м}^2.$$

Масса металла обмотки ВН

$$G_{O2} = 8,47 \cdot 3 \frac{42,4 + 52,4}{2} 1330 \cdot 16,3 \cdot 10^{-5} = 261,1 \text{ кг.}$$

Масса провода по табл. 5-5

$$G_{пр2} = (1 + 0,025 \cdot 3,3) \cdot 261,1 = 282,7 \text{ кг.}$$

Масса металла двух обмоток

$$G_0 = 156,2 + 261,1 = 417,3 \text{ кг.}$$

Масса провода двух обмоток $G_{пр} = 166,5 + 282,7 = 449,2 \text{ кг.}$

После намотки и сушки обмотку опрессовать осевой силой 25 000 Н.

Глава седьмая

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

7-1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Потерями короткого замыкания двухобмоточного трансформатора согласно ГОСТ 16110-70 называются потери, имеющие место в трансформаторе при установлении в одной из обмоток тока, соответствующего номинальной мощности, и замкнутой накоротко другой обмотке.

Потери короткого замыкания P_k в трансформаторе могут быть разделены на следующие составляющие. 1) основные потери в обмотках НН и ВН, вызванные рабочим током обмоток, $P_{осн1}$ и $P_{осн2}$; 2) добавочные потери в обмотках НН и ВН, т. е. потери от токов, наведенных полем рассеяния в обмотках и создающих неравномерное распределение тока по сечению проводов, $P_{д1}$ и $P_{д2}$; 3) основные потери в отводах между обмотками и вводами (проходными изоляторами) трансформатора $P_{отв1}$ и $P_{отв2}$; 4) добавочные потери в отводах, вызванные полем рассеяния отводов, $P_{отв.д1}$ и $P_{отв.д2}$; 5) потери в стенках бака и других металлических элементах конструкции трансформатора, вызванные полем рассеяния обмоток и отводов, $P_б$.

Обычно добавочные потери в обмотках и отводах рассчитывают, определяя коэффициент k_d увеличения основных потерь вследствие наличия поля рассеяния. Так, сумма основных и добавочных потерь в обмотке заменяется выражением

$$P_{осн1} + P_{д1} = P_{осн1} k_{д1}.$$

Таким образом, полные потери короткого замыкания, Вт, могут быть выражены формулой

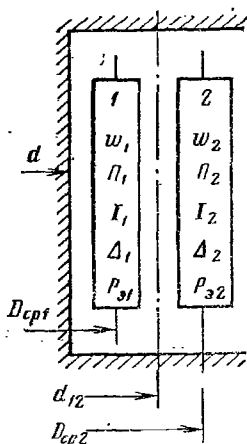
$$P_k = P_{осн1} k_{д1} + P_{осн2} k_{д2} + P_{отв1} k_{д.отв1} + \\ + P_{отв2} k_{д.ств2} + P_6. \quad (7-1)$$

Согласно ГОСТ 11677-75 за расчетную (условную) температуру, к которой должны быть приведены потери и напряжение короткого замыкания, принимают: $+75^\circ\text{C}$ для всех масляных и для сухих трансформаторов с изоляцией классов нагревостойкости А, Е, В; $+115^\circ\text{C}$ для трансформаторов с изоляцией классов нагревостойкости F, H, C.

Полные потери короткого замыкания готового трансформатора не должны отклоняться от гарантийного значения, заданного ГОСТ или техническими условиями на проект трансформатора, более чем на $+10\%$. Учитывая, что потери готового трансформатора вследствие нормальных допустимых отклонений в размерах его частей могут отклоняться на $\pm 5\%$ от расчетного значения при расчете следует допускать отклонение расчетных потерь короткого замыкания от гарантийного значения не более чем на $+5\%$.

При нормальной работе трансформатора, т. е. при нагрузке его номинальным током при номинальных первичном напряжении и частоте, в его обмотках, отводах и элементах конструкции под воздействием токов обмоток и созданного ими поля рассеяния возникают потери, практически равные потерям короткого замыкания и одинаково с ними изменяющиеся при изменении тока нагрузки. Поэтому при всех расчетах потерь, вызванных в нормально работающем трансформаторе изменяющимися токами нагрузки обмоток, и при расчете к. п. д. трансформатора обычно в качестве исходной величины пользуются рассчитанными или измеренными потерями короткого замыкания.

В трехобмоточном трансформаторе рассчитываются и измеряются три значения потерь короткого замыкания для трех парных сочетаний обмоток (*I* и *II*, *I* и *III*, *II* и *III*) при нагрузке каждой пары обмоток током, соответствующим 100% мощности трансформатора. Потери короткого замыкания трехобмоточного трансформатора изменяются в зависимости от того, как распределена нагрузка между тремя его обмотками. Допускается любое распределение нагрузки между тремя обмотками, но так, чтобы ни одна из обмоток не была длительно нагружена током, превышающим номинальный ток плюс 5%-ная перегрузка, а общие потери короткого замыкания трех обмоток не превысили максимальные потери. При этом максимальными потерями считаются приведенные к расчетной температуре потери короткого замыкания той пары обмоток, которая имеет наибольшие потери короткого замыкания.



перезгрузка, а общие потери короткого замыкания трех обмоток не превысили максимальные потери. При этом максимальными потерями считаются приведенные к расчетной температуре потери короткого замыкания той пары обмоток, которая имеет наибольшие потери короткого замыкания.

Определение основных потерь в обмотках

Для определения основных потерь можно воспользоваться формулой $P_{осн} = I^2 R$. Однако на практике принято пользоваться этой формулой в преобразованном, более удобном для расчета виде. За-

Рис. 7-1. К определению массы металла и потерь в обмотках.

меняя ток I произведением плотности тока в обмотке Δ (А/мм²) на сечение витка Π (мм²) и раскрывая значение $R = \rho l / \Pi$, где ρ — удельное сопротивление провода (мкОм·м, т. е. Ом·мм²/м), а l — полная длина провода в метрах, получаем:

$$P_{осн} = \Delta^2 \Pi^2 \rho l / \Pi = \Delta^2 (\Pi l) \rho.$$

Заметив, что выражение, в скобках (Πl) представляет собой объем провода обмотки, выраженный в кубических сантиметрах, умножаем и делим правую часть равенства на плотность металла обмотки γ_0 , кг/м³, и множитель 10⁶:

$$P_{осн} = \Delta^2 \left(\Pi l \frac{\gamma_0}{10^6} \right) \rho \frac{10^6}{\gamma_0}.$$

Заменив в этом выражении произведение, заключенное в скобках, равной ему массой металла обмотки G_0 (кг) и подставив реальные значения плотности γ_0 и удельного электрического сопротивления металла обмотки ρ при температуре 75°C , получаем:

$$P_{\text{осн}} = k \Delta^2 G_0. \quad (7-2)$$

Для медного провода ($\gamma_M = 8900 \text{ кг/м}^3$, и $\rho_{M75} = 0,02135 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$)

$$P_{\text{осн M}} = 2,4 \Delta^2 G_M; \quad (7-3)$$

для алюминиевого провода ($\gamma_A = 2700 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{A75} = 0,0344 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$)

$$P_{\text{осн A}} = 12,75 \Delta^2 G_A. \quad (7-4)$$

При температуре 115°C коэффициенты в формулах (7-3) и (7-4) равны: 2,72 для меди ($\rho_{115} = 0,0242 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$) и 14,4 для алюминия ($\rho_{115} = 0,0386 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$).

Масса металла, кг, каждой из обмоток может быть найдена по рис. 7-1 и формуле

$$G_0 = \pi D_{\text{ср}} w \Pi \gamma_0 \cdot 10^{-5},$$

где c — число активных (несущих обмотки) стержней трансформатора;

$D_{\text{ср}}$ — средний диаметр обмотки, см;

w — число витков обмотки;

Π — сечение витка, мм^2 .

Подставляя π и реальное значение γ_0 , получаем:

$$G_0 = k_\gamma c D_{\text{ср}} w \Pi \cdot 10^{-5}, \quad (7-5)$$

где

$$k_\gamma = \pi \gamma_0 \cdot 10^{-3}.$$

Для медного провода ($\gamma_M = 8900 \text{ кг/м}^3$)

$$G_M = 28 c D_{\text{ср}} w \Pi \cdot 10^{-5}; \quad (7-6)$$

для алюминиевого провода ($\gamma_A = 2700 \text{ кг/м}^3$)

$$G_A = 8,47 c D_{\text{ср}} w \Pi \cdot 10^{-5}. \quad (7-7)$$

При определении потерь в обмотках ВН в (7-6) и (7-7) подставляют число витков на средней ступени напряжения $w_{н2}$. При определении общей массы металла обмотки ВН подставляют полное число витков обмотки на верхней ступени w_2 .

В практике расчета трансформаторов часто предельное значение потерь короткого замыкания бывает задано. В частности, для всех силовых трансформаторов общего назначения оно регламентировано государственными стандартами СССР. Это обстоятельство налагает ограничения на выбор плотности тока при расчете обмоток трансформаторов. Выше было показано, что основные потери в обмотках могут быть подсчитаны по (7-2). Подставляя в эту формулу значение G_0 по (7-5), получаем:

$$P_{\text{осн}} = k\Delta^2 k_{\gamma} c D_{\text{ср}} w \Pi \cdot 10^{-5}.$$

Далее, заменяя $w = U_c / u_{\text{в}}$; $\Pi = I_c / \Delta$, где U_c и I_c — напряжение и ток обмотки одного стержня, получаем:

$$P_{\text{осн}} = k\Delta^2 k_{\gamma} c D_{\text{ср}} \frac{U_c}{u_{\text{в}}} \frac{I_c}{\Delta} 10^{-3} \cdot 10^{-2}.$$

Замечая, что $U_c I_c \cdot 10^{-3} = S$ — мощность обмотки одного стержня, кВ·А, получаем потери в одной обмотке

$$P_{\text{осн}} = k k_{\gamma} \cdot 10^{-2} c \frac{S}{u_{\text{в}}} D_{\text{ср}} \Delta.$$

Основные потери в двух обмотках двухобмоточного трансформатора определяются по формуле

$$P_{\text{осн}} = k k_{\gamma} \cdot 10^{-2} c \frac{S'}{u_{\text{в}}} (D_{\text{ср1}} \Delta_1 + D_{\text{ср2}} \Delta_2). \quad (7-8)$$

Практика большого числа расчетов трансформаторов показывает, что выражение, заключенное в скобки в (7-8), можно с достаточной степенью точности заменить

$$D_{\text{ср1}} \Delta_1 + D_{\text{ср2}} \Delta_2 \approx 2d_{12} \Delta_{\text{ср}},$$

где d_{12} — средний диаметр канала между обмотками; $\Delta_{\text{ср}} = (\Delta_1 + \Delta_2) / 2$ — средняя арифметическая плотность тока в обмотках, А/мм².

Замечая также, что $c S' = S$ — полная мощность трансформатора, получаем:

$$P_{\text{осн}} = k k_{\gamma} \cdot 10^{-2} \frac{S}{u_{\text{в}}} 2d_{12} \Delta_{\text{ср}}$$

и далее

$$\Delta_{\text{ср}} = \frac{10^2}{2kk_{\gamma}} \frac{P_{\text{осн}} u_{\text{в}}}{Sd_{12}}. \quad (7-9)$$

В силовых трансформаторах общего назначения основные потери в обмотках составляют от 0,75 до 0,95 потерь короткого замыкания $P_{\text{к}}$. Обозначив это отношение $P_{\text{осн}}/P_{\text{к}}=k_{\text{д}}$ и подставив $k_{\text{д}}P_{\text{к}}=P_{\text{осн}}$ в выражение (7-9), получим:

$$\Delta_{\text{ср}} = \frac{10^2}{2kk_{\gamma}} k_{\text{д}} \frac{P_{\text{к}} u_{\text{в}}}{Sd_{12}}.$$

Для медного провода ($k=2,4$, $k_{\gamma}=28$)

$$\Delta_{\text{ср}} = 0,746k_{\text{д}} \frac{P_{\text{к}} u_{\text{в}}}{Sd_{12}}; \quad (7-10)$$

для алюминиевого провода ($k=12,75$, $k_{\gamma}=8,47$)

$$\Delta_{\text{ср}} = 0,463k_{\text{д}} \frac{P_{\text{к}} u_{\text{в}}}{Sd_{12}}. \quad (7-10')$$

При температуре обмоток 115°C коэффициенты в (7-10) и (7-10') соответственно равны 0,658 и 0,4105.

Значения $k_{\text{д}}$ для силовых трансформаторов общего назначения могут быть взяты из табл. 3-6.

Формулы (7-10) и (7-10') связывают среднюю плотность тока в обмотках трансформатора с заданными величинами S , $P_{\text{к}}$ и величинами, определяемыми в начале расчета до выбора конструкции обмоток d_{12} и $u_{\text{в}}$. Эти формулы позволяют уже в начале расчета с достаточной точностью найти среднюю плотность тока в обмотках, обеспечивающую получение заданных потерь короткого замыкания. Эти формулы являются приближенными и полностью справедливы лишь при равенстве плотностей тока в обмотках Δ_1 и Δ_2 . При подборе реальных сечений проводов по сортаменту обмоточного провода всегда возможны отклонения истинных значений Δ_1 и Δ_2 от найденного $\Delta_{\text{ср}}$. Для того чтобы эти отклонения не привели к существенному изменению $P_{\text{к}}$, рекомендуется не допускать их более 5—10% от $\Delta_{\text{ср}}$, так чтобы полусумма действительных значений Δ_1 и Δ_2 была практически равна $\Delta_{\text{ср}}$. Поскольку обмотка ВН как наружная обмотка всег-

да по объему и массе больше обмотки НН, то при $\Delta_2 > \Delta_1$ потери короткого замыкания будут отклоняться от заданных P_K в большую сторону и при $\Delta_2 < \Delta_1$ — в меньшую сторону.

В сухих трансформаторах вследствие лучших условий охлаждения внешней обмотки (ВН) в этой обмотке допускается более высокая плотность тока Δ_2 , чем Δ_1 во внутренней обмотке (НН), т. е. всегда $\Delta_2 > \Delta_1$. Поэтому во избежание отклонения P_K от заданной в большую сторону рекомендуется для сухих трансформаторов принимать $\Delta_{ср}$, около 0,93—0,97 значений, полученных по (7-10) или (7-10').

Добавочные потери в обмотках

Выше было указано, что определение добавочных потерь в обмотках практически сводится к расчету коэффициента увеличения основных электрических потерь обмотки k_d . Этот коэффициент подсчитывается отдельно для каждой обмотки трансформатора. Значение коэффициента зависит от частоты тока f , размеров проводников обмотки, их удельного электрического сопротивления ρ и их расположения по отношению к полю рассеяния трансформатора.

Любая обмотка трансформатора, намотанная из прямоугольного или круглого провода, может быть для расчета коэффициента k_d условно представлена в таком виде, как на рис. 7-2. При этом в такой условной обмотке должно быть сохранено число проводников реальной обмотки в направлениях, параллельном и перпендикулярном направлению потока рассеяния. Наличие каналов, параллельных направлению потока рассеяния, как это будет видно из расчетных формул, не влияет на k_d .

Добавочные потери от вихревых токов, вызванные собственным магнитным полем рассеяния обмоток, неодинаковы для отдельных проводников, различным образом расположенных в обмотке по отношению к полю рассеяния.

Наибольшие добавочные потери в двухобмоточном трансформаторе возникают в проводниках, находящихся в зоне наибольших индукций, т. е. в слое проводников, прилегающем к каналу между обмотками. Наименьшие потери возникают в слое, наиболее удаленном от соседней обмотки. Коэффициент добавочных потерь для про-

проводников любого слоя с номером k (рис. 7-2, а) может быть найден по формуле

$$k_{д.к} = 1 + 5,2 \beta^2 \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 a^4 (k - 0,5)^2. \quad (7-11)$$

При расчете потерь короткого замыкания обычно рассчитывают средний коэффициент увеличения потерь для всей обмотки, если она имеет однородную структуру, или для отдельных ее частей, если они отличаются размерами или взаимным расположением проводников.

Средний коэффициент k_d для обмотки из прямоугольного провода

$$k_d = 1 + 1,73 \beta^2 \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 a^4 (n^2 - 0,2); \quad (7-12)$$

для круглого провода

$$k_d = 1 + 0,8 \beta^2 \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 d^4 (n^2 - 0,2). \quad (7-12')$$

В этих выражениях β может быть подсчитана по формулам:

для прямоугольного провода по (7-12)

$$\beta = \frac{bm}{l} k_p; \quad (7-13)$$

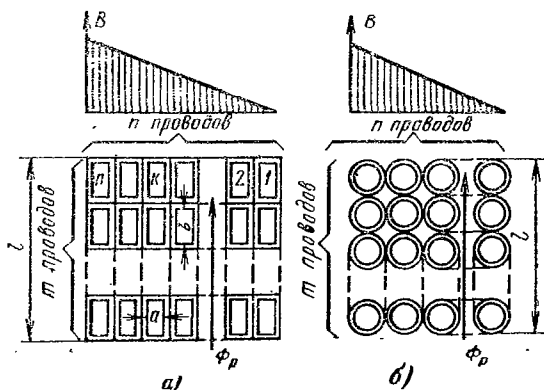


Рис. 7-2. К определению добавочных потерь в обмотках.

а — из прямоугольного провода; б — из круглого провода (стрелкой показано направление индукционных линий поля рассеяния Φ_p).

для круглого провода по (7-12')

$$\beta_1 = \frac{dm}{l} k_p. \quad (7-13')$$

Значения β и β_1 для изолированного провода всегда меньше единицы.

В формулах (7-11) — (7-13):

f — частота тока, Гц;

ρ — удельное электрическое сопротивление металла обмоток, мкОм·м;

n — число проводников обмотки в направлении, перпендикулярном направлению линий магнитной индукции поля рассеяния;

m — число проводников обмотки в направлении, параллельном направлению линий магнитной индукции поля рассеяния;

a — размер проводника, перпендикулярный направлению линий магнитной индукции поля рассеяния;

b — размер проводника, параллельный направлению линий магнитной индукции поля рассеяния;

l — общий размер обмотки в направлении, параллельном направлению линий магнитной индукции поля рассеяния;

d — диаметр круглого проводника;

k_p — коэффициент приведения поля рассеяния (см. § 7-2).

Значения a , b , d при определении k_d следует выражать в сантиметрах. Коэффициент k_p , если расчет k_d производится до расчета напряжения короткого замыкания, может быть для концентрических обмоток принят $k_p = 0,95$.

Для некоторых частных случаев, например при частоте 50 Гц, для медных и алюминиевых проводов можно пользоваться следующими формулами:

для медного прямоугольного провода ($\rho_m = 0,02135$ мкОм·м) при $f = 50$ Гц и $n \leq 2$

$$k_{дм} = 1 + 0,095 \beta^2 a^4 (n^2 - 0,2); \quad (7-14)$$

при $n > 2$

$$k_{дм} = 1 + 0,095 \beta^2 a^4 n^2; \quad (7-14')$$

для круглого провода ($n > 2$)

$$k_{дм} = 1 + 0,044 \beta_1^2 d^4 n^2; \quad (7-14'')$$

для алюминиевого прямоугольного провода ($\rho_A = 0,0344$ мкОм·м) при $f = 50$ Гц и $n \leq 2$

$$k_{дА} = 1 + 0,037 \beta^2 a^4 (n^2 - 0,2); \quad (7-15)$$

при $n > 2$

$$k_{дА} = 1 + 0,037 \beta^2 a^4 n^2; \quad (7-15')$$

для круглого провода ($n > 2$)

$$k_{дА} = 1 + 0,17 \beta_1^2 d^4 n^2. \quad (7-15'')$$

Добавочные потери в обмотках трансформатора возникают как от продольного поля рассеяния с осевым по отношению к обмоткам направлением индукционных линий, так и от поперечного поля с радиальным направлением линий. Поперечное поле, возникающее при неравномерном распределении тока (витков) по высоте обмотки и вследствие отклонения от осевого направления индукционных линий продольного поля вблизи торцов обмотки, имеет сложную форму, однако оно всегда может быть разбито на ряд участков с линейным распределением индукции, аналогичным рис. 7-2. Для каждого такого участка расчет коэффициента добавочных потерь может быть произведен с применением формул (7-11), (7-12).

В винтовых обмотках, кроме добавочных потерь, вызванных полем рассеяния, могут возникать добавочные потери вследствие неравномерного распределения тока между параллельными проводами от несовершенства транспозиций. При этом равномерно распределенная транспозиция в двух- или четырехходовой обмотке может считаться совершенной и практически не вызывающей добавочных потерь. В одноходовых обмотках с одной общей и двумя групповыми транспозициями (§ 5-5) при четырех параллельных проводах можно не учитывать добавочных потерь от несовершенства транспозиций.

При числе параллельных проводов $n = 5$ и больше средний коэффициент добавочных потерь в такой обмотке может быть приближенно рассчитан по формуле

$$k_{дм} = 1 + 0,53 \cdot 10^{-2} \beta^2 \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 a^4 (n^4 - 20n^2 + 64), \quad (7-16)$$

где все обозначения те же, что и в формулах (7-11) — (7-15).

Из формул (7-11) и (7-12) видно, что добавочные потери пропорциональны четвертой степени размера проводника (a или d), измеренного в направлении, перпендикулярном направлению поля рассеяния. Поэтому в концентрических обмотках с осевым направлением поля рассеяния следует стараться располагать прямоугольный провод большим размером в осевом направлении, т. е. наматывать его плашмя. При намотке того же провода на ребро добавочные потери возрастают в несколько раз.

Добавочные потери в обмотках силовых трансформаторов с концентрическими обмотками обычно достигают от 0,5—1,0 до 3,0—5,0% от основных потерь и в некоторых случаях до 10% при прямоугольном проводе и, как правило, не более 1% в случае применения круглого провода с диаметром не более 3,53 мм.

При продолжительном режиме работы трансформатора все потери, выделяющиеся в обмотках в виде тепла, должны быть отведены в масло с открытой поверхности обмоток. При этом разность температур поверхности обмотки и масла будет тем больше, чем больше плотность теплового потока q на поверхности обмотки, т. е. потери, отнесенные к единице охлаждаемой поверхности.

Для всех обмоток из прямоугольного и круглого проводов q может быть найдена по формулам (6-16) или (6-35), требующим предварительного расчета охлаждаемой поверхности. Для некоторых обмоток из прямоугольного провода могут быть получены формулы для расчета q и без определения поверхности.

Рассмотрим элемент провода цилиндрической обмотки длиной 1 см (рис. 7-3, а). Объем этого элемента $v = ab \cdot 1$, см³, масса его $g = v\gamma \cdot 10^{-6} = ab\gamma \cdot 10^{-6}$, кг, где γ — плотность металла провода, кг/м³.

Потери в выделенном элементе объема по (7-1) и (7-2), Вт,

$$p = k\Delta^2 g k_d = k\Delta^2 ab\gamma k_d \cdot 10^{-6}.$$

Охлаждаемая поверхность элемента, м², при условии, что каждый провод обмотки омывается маслом с двух сторон (рис. 7-3, а),

$$P_o = k_s \cdot 2a' \cdot 1 \cdot 10^{-4},$$

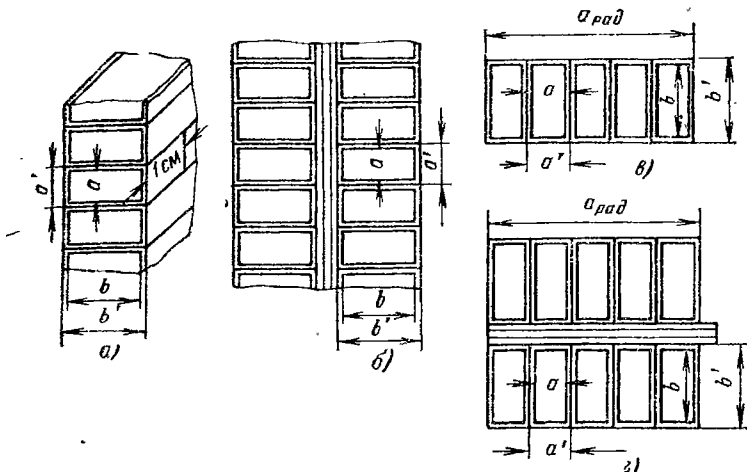


Рис. 7-3. К расчету q в обмотках разных типов.

где k_z — коэффициент, учитывающий закрытие части поверхности обмотки изоляционными деталями, рейками и т. д.

Потери, отнесенные к единице поверхности, Вт/м²,

$$q = \frac{p}{\Pi_0} = \frac{k\Delta^2 ab\gamma k_d \cdot 10^{-6}}{k_s \cdot 2a' \cdot 1 \cdot 10^{-4}} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{k_s} k k_d b \frac{a}{a'} \gamma \Delta^2.$$

Для медного провода ($k_M = 2,4$; $\gamma_M = 8900$ кг/м³)

$$q_M = \frac{107}{k_s} b \frac{a}{a'} \Delta^2 k_d; \quad (7-17)$$

для алюминиевого провода ($k_A = 12,75$; $\gamma_A = 2700$ кг/м³)

$$q_A = \frac{172}{k_s} b \frac{a}{a'} \Delta^2 k_d. \quad (7-17')$$

Для потерь, рассчитанных при температуре 115°C, числовые коэффициенты в формулах (7-17) и (7-17') соответственно равны 131 и 194.

Из (7-17) и (7-17') могут быть получены выражения для определения предельного размера провода b в начале расчета обмоток при заданных значениях q и Δ .

Полагая $(a/a')k_d \approx 1$, находим:

$$b_M \leq \frac{qk_3}{107 \Delta^2}. \quad (7-18)$$

$$b_A \leq \frac{qk_3}{172 \Delta^2}. \quad (7-18')$$

Для цилиндрической обмотки k_3 может быть принят 0,75. Для двухслойной обмотки без охлаждающего канала между слоями (рис. 7-3, б) в формулах (7-17) и (7-17') следует ввести множитель 2 (или n при числе слоев n) в числитель, а в формулах (7-18) и (7-18') — в знаменатель.

В обмотках винтовых и катушечных с каналами между всеми витками или катушками (рис. 7-3, в) потери в элементе объема обмотки, Вт,

$$p = k\Delta^2 abn_{\text{пр}} \gamma k_d \cdot 10^{-6},$$

где $n_{\text{пр}}$ — число витков в катушке или параллельных проводов в витке винтовой обмотки. Заменив $\Delta = I_{\text{пр}} \cdot 10^{-2} / ab$ и отнеся потери к единице поверхности элемента, м²,

$$P_0 = k_3 \cdot 2(b' + a'n_{\text{пр}}) \cdot 1 \cdot 10^{-4},$$

получим:

$$q = \frac{k\Delta I_{\text{пр}} n_{\text{пр}} \gamma k_d \cdot 10^{-8}}{k_3 2(b' + a'n_{\text{пр}}) \cdot 1 \cdot 10^{-4}}.$$

Для меди

$$q_M = \frac{1,07 \Delta I \omega_k k_d}{k_3 (b' + a_{\text{рад}})}; \quad (7-19)$$

для алюминия

$$q_A = \frac{1,72 \Delta I \omega_k k_d}{k_3 (b' + a_{\text{рад}})}, \quad (7-19')$$

где I — ток обмотки фазы (для однофазного трансформатора ток обмотки стержня);

ω_k — число витков в катушке: для винтовой одноходовой обмотки 1,0; для двухходовой винтовой обмотки 0,5;

k_3 — коэффициент закрытия поверхности, $k_3 = 0,75$;
 $a_{\text{рад}}$ — радиальный размер обмотки, см.

Для обмоток со сдвоенными катушками или витками (рис. 7-3, *г*):

для меди

$$q_M = \frac{2,14 \Delta I w_k k_D}{k_3(2b' + a_{\text{рад}})}; \quad (7-19'')$$

для алюминия

$$q_A = \frac{3,44 \Delta I w_k k_D}{k_3(2b' + a_{\text{рад}})}. \quad (7-19''')$$

В начале расчета обмоток для предварительной приближенной оценки q или выбора предельного (по заданным q и Δ) размера провода для винтовых и катушечных обмоток можно пользоваться формулами (7-18) и (7-18'), приняв в них $k_3 = 1$.

Формулы (7-17) — (7-19) являются справедливыми как для масляных, так и для сухих трансформаторов с расчетной температурой обмоток, к которой приведены потери короткого замыкания, 75°C. При расчете сухих трансформаторов с расчетной температурой обмоток 115°C можно пользоваться (7-19), заменив в них коэффициенты 1,07; 1,72; 2,14 и 3,44 соответственно на 1,31; 1,94; 2,62 и 3,88.

Подсчет основных потерь в отводах сводится к определению длины проводников и массы металла в отводах. Этот подсчет может быть точно произведен после окончательного установления конструкции отводов. В процессе расчета может быть произведено приближенное определение массы отводов.

Принимая сечение отвода равным сечению витка обмотки

$$P_{\text{отв}} \approx P_{\text{обм}} \quad (7-20)$$

и общую длину проводов для соединения в звезду

$$l_{\text{отв}} \approx 7,5 l \quad (7-21)$$

и для соединения в треугольник

$$l_{\text{отв}} \approx 14 l, \quad (7-22)$$

массу металла проводов отводов можно найти по формуле

$$G_{\text{отв}} = l_{\text{отв}} P_{\text{отв}} \gamma \cdot 10^{-8}, \quad (7-23)$$

где $l_{\text{отв}}$, см; $P_{\text{отв}}$, мм²; γ — плотность металла отводов (для меди $\gamma_{\text{м}} = 8900$ кг/м³, для алюминия $\gamma_{\text{А}} = 2700$ кг/м³).

Основные потери в отводах определяются по формуле

$$P_{\text{отв}} = k \Delta^2 G_{\text{отв}}, \quad (7-24)$$

где k в зависимости от металла отводов принимается таким же, как в (7-3) и (7-4).

В силовых трансформаторах общего назначения потери в отводах составляют, как правило, не более 5—8% потерь короткого замыкания, а добавочные потери в отводах — не более 5% основных потерь в отводах. Поэтому предварительный расчет потерь с определением длины отводов по формуле (7-21) или (7-22) дает достаточно точный результат, и необходимость в определении добавочных потерь в отводах отпадает.

Потери в стенках бака и других стальных деталях трансформатора

Поля рассеяния обмоток и отводов трансформатора, возникая в пространстве, окружающем эти части, проникают также и в ферромагнитные детали конструкции трансформатора — стенки бака, прессующие балки ярем, прессующие кольца обмоток и т. д.

Потери, возникающие в этих ферромагнитных деталях от гистерезиса и вихревых токов, также относятся к потерям короткого замыкания. Эти потери зависят от распределения и интенсивности поля рассеяния, от расположения, формы и размеров ферромагнитных деталей и от, вообще говоря, нестабильных магнитных свойств современных конструкционных сталей.

Расчет и учет потерь в деталях конструкции представляет собой чрезвычайно сложную задачу, которая в настоящее время полностью не решена. Предложен ряд методов более или менее приближенного расчета, основанных на ряде допущений в построении поля рассеяния вблизи ферромагнитных деталей, в приведении реальных размеров бака к условным расчетным размерам и на учете средне статистических магнитных свойств материалов. Несмотря на ряд упрощений, эти методы требуют большой расчетной работы с применением средств вычислительной техники и при применении различных методов

к одному расчету нередко дают результаты, существенно различающиеся.

С ростом номинальной мощности трансформатора возрастают поток и напряженность магнитного поля рассеяния. Это особенно сказывается в трехобмоточных трансформаторах, где поток рассеяния при работе на двух крайних обмотках может достигать 18—25% основного потока, и в автотрансформаторах, где он достигает 30—40%. Вместе с ростом мощности возрастают и потери от гистерезиса и вихревых токов в ферромагнитных деталях конструкции трансформатора — стенке бака, ярмовых балках, прессующих кольцах обмоток и т. д. Эти потери не только понижают к. п. д. трансформатора, но при концентрации потерь в отдельных деталях, также создают опасность нагрева этих деталей до недопустимой температуры. Особое значение проблема этих потерь приобретает при мощностях от 80 000 кВ·А и более.

Задачей расчетчика и конструктора трансформатора является не только расчет добавочных потерь в деталях конструкции, но также и правильный выбор конструктивных форм магнитной системы, обмоток, стенок бака и других деталей, обеспечивающих получение наименьших добавочных потерь в деталях конструкции и отсутствие мест опасного сосредоточения этих потерь.

Основными мерами по уменьшению добавочных потерь в настоящее время служат: рациональное распределение витков обмоток и поля рассеяния в трансформаторе, правильный выбор размеров и формы деталей, применение материалов, в которых не возникают или возникают малые потери в переменном магнитном поле.

В целях рационального распределения поля рассеяния применяются главным образом магнитные шунты в виде пакетов электротехнической стали, экранирующие стенки бака или ярмовые балки и концентрирующие в себе большую часть поля рассеяния. Применяются также электромагнитные экраны из листов или полос цветных металлов. Применение магнитных шунтов и электромагнитных экранов целесообразно в тех случаях, когда сумма потерь в шунте или экране с новыми потерями в баке существенно меньше потерь в неэкранированном или незашунтированном баке. Большой эффект в снижении добавочных потерь может дать замена ряда стальных деталей — прессующих колец обмоток, ярмовых балок и т. д. — деталями из специальных немагнитных сталей

или пластмасс, дающих возможность уменьшить эти потери или вообще избавиться от них. Интересно отметить, что некоторые иностранные фирмы в трансформаторах мощностью до 10 000—16 000 кВ·А заменяют стальные ярмовые балки склеенными из деревянных пластин.

Поскольку при рациональной конструкции трансформатора потери в ферромагнитных конструктивных деталях составляют сравнительно небольшую часть потерь короткого замыкания, расчетное определение этих потерь для трансформаторов общего назначения в ограниченном диапазоне мощностей можно проводить, используя приближенные методы. На этапе расчета обмоток, когда размеры бака еще неизвестны, для трансформаторов мощностью от 100 до 63 000 кВ·А можно с достаточным приближением определить потери в баке и деталях конструкции по формуле

$$P_6 \approx 10 k S, \quad (7-25)$$

где S — полная мощность трансформатора, кВ·А;
 k — коэффициент, определяемый по табл. 7-1.

После расчета бака для трансформаторов мощностью от 10 000 до 63 000 кВ·А добавочные потери в стенках могут быть приближенно подсчитаны для частоты 50 Гц по полуэмпирической формуле

$$P_6 = \frac{k u_p^2 \Phi^2 l^3 \cdot 10^{-4}}{p_6 [l + 2(R - r_{12})]^2}, \quad (7-26)$$

где $k = 2,20$ при $u_k \leq 11,5\%$, $k = 1,50$ при $u_k > 11,5\%$;

Φ — поток одного стержня, равный $P_6 B_c$, Вб;

l — высота обмотки, см;

p_6 — периметр гладкого бака, см;

R — средний радиус бака: $R = (A + B - 2C)/4$, см
 (A — длина бака; B — ширина бака; C — расстояние между осями стержней);

r_{12} — средний радиус канала рассеяния, см.

Таблица 7-1

Значения коэффициента k в формуле (7-25)

Мощность, кВ·А	До 1000	1000—4000	6300—10 000	16 000—25 000	40 000—63 000
k	0,01—0,015	0,02—0,03	0,03—0,04	0,04—0,05	0,06—0,07

В трехобмоточных трансформаторах рассчитывают три значения потерь короткого замыкания для трех случаев работы трансформатора при нагрузке 100% номинальной мощности как двухобмоточного на обмотках ВН и СН, ВН и НН и СН и НН. За потери короткого замыкания трехобмоточного трансформатора принимается наибольшее из этих трех значений P_K .

Расчет основных потерь короткого замыкания для каждой из обмоток трехобмоточного трансформатора производится так же, как и для двухобмоточного. При этом считают, что каждая обмотка нагружена током, соответствующим 100%-ной номинальной мощности трансформатора (для обмоток, рассчитываемых на 67% номинальной мощности, 1,5 значения номинального тока).

Добавочные потери в двух крайних обмотках — наружной обмотке ВН и внутренней обмотке (СН или НН) рассчитываются так же, как и для двухобмоточного трансформатора, по (7-12) или одной из последующих формул.

Добавочные потери в средней из трех обмоток на каждом стержне (НН или СН) рассчитываются для двух различных режимов работы — для 100%-ной нагрузки этой обмотки с любой из двух других обмоток по формуле (7-12) или одной из последующих и для 100%-ной нагрузки двух других (крайних) обмоток при отсутствии тока в средней обмотке.

В последнем случае средняя обмотка не имеет собственного поля рассеяния, но находится в магнитном поле с постоянной по ширине обмотки индукцией, созданном двумя крайними обмотками (рис. 7-4). Это поле вызывает в средней обмотке потери от вихревых токов

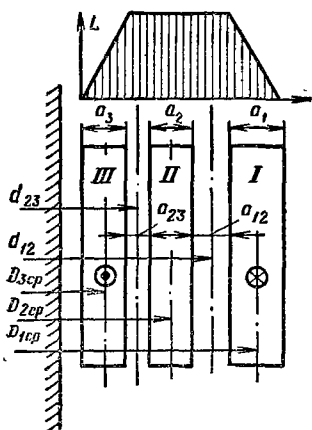


Рис. 7-4. К расчету добавочных потерь и напряжения короткого замыкания в трехобмоточном трансформаторе. Распределение индукции поля рассеяния при нагрузке двух крайних обмоток I и III.

$P_{вп}$, Вт, которые могут быть рассчитаны по формуле

$$P_{вп} = (k_{д.к} - 1) P_{осн II}, \quad (7-27)$$

где $k_{д.к}$ — коэффициент добавочных потерь, рассчитанный для средней обмотки по формуле (7-11) при $k=n$ (n — число проводов обмотки в радиальном направлении);

$P_{осн II}$ — основные потери в средней обмотке при токе, соответствующем 100%-ной номинальной мощности трансформатора.

Расчет потерь в отводах для трехобмоточного трансформатора проводится так же, как и в двухобмоточном, отдельно для каждой из трех обмоток, при токе, соответствующем 100%-ной номинальной мощности.

Потери в стенках бака и стальных деталях конструкции определяются для трех случаев нагрузки трансформатора ВН — СН, ВН — НН и СН — НН по (7-26) для соответствующих значений u_p .

Полные потери короткого замыкания для каждой пары обмоток трехобмоточного трансформатора могут быть подсчитаны по (7-1). При этом для каждой пары обмоток должно быть подставлено свое значение P_6 , а при определении потерь пары крайних обмоток I и III по рис. 7-4 прибавлены добавочные потери в средней обмотке $P_{вп}$, найденные по (7-27).

Расчет потерь короткого замыкания двухобмоточного автотрансформатора проводится так же, как и для двухобмоточного трансформатора для токов обмоток I_1 и I_2 . При этом P_6 рассчитывается для расчетного напряжения $u_{кр}$ (§ 3-2). При расчете потерь для трехобмоточного автотрансформатора с автотрансформаторной связью двух обмоток и трансформаторной связью между этими обмотками и третьей обмоткой следует учитывать замечания, изложенные в § 7-1, относительно расчета потерь для трехобмоточных трансформаторов и указания § 3-2 относительно расчета автотрансформаторов.

7-2. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Напряжением короткого замыкания двухобмоточного трансформатора называется приведенное к расчетной температуре напряжение, которое следует подвести при номинальной частоте к зажимам одной из обмоток при

замкнутой накоротко другой обмотке, чтобы в обеих обмотках установились номинальные токи. При этом переключатель должен находиться в положении, соответствующем номинальному напряжению.

Напряжение короткого замыкания определяет падение напряжения в трансформаторе, его внешнюю характеристику и ток короткого замыкания. Оно учитывается также при подборе трансформаторов для параллельной работы.

В трехобмоточном трансформаторе напряжение короткого замыкания определяется подобным же образом для любой пары его обмоток при разомкнутой третьей обмотке. Поэтому трехобмоточный трансформатор имеет три, вообще говоря, различных напряжения короткого замыкания. Для всех трансформаторов напряжение короткого замыкания и его составляющие принято выражать в процентах номинального напряжения, а активную составляющую определять для средней эксплуатационной температуры обмоток 75°C для всех масляных и для сухих трансформаторов с изоляцией классов нагревостойкости А, Е, В. Для трансформаторов с изоляцией классов F, H, С расчетная температура 115°C . Активная составляющая напряжения короткого замыкания, В, может быть записана так: $U_a = r_k I_n$, где r_k — активное сопротивление короткого замыкания трансформатора, приведенное к одной из его обмоток, с учетом добавочных потерь в обмотках, потерь в отводах и в металлических конструкциях; I_n — номинальный ток обмотки, к числу витков которой приведено сопротивление $r_k = r_1 + r_2'$.

Выражая активную составляющую в процентах номинального напряжения, получаем:

$$u_a = \frac{U_a}{U_n} 100 = \frac{r_k I_n}{U_n} 100.$$

Умножая числитель и знаменатель на число фаз m и номинальный фазный ток I_n , получаем формулу, справедливую для трансформатора с любым числом фаз:

$$u_a = \frac{r_k I_n^2 m}{U_n I_n m} 100 = \frac{P_k}{S \cdot 10^3} 100 = \frac{P_k}{10S}, \quad (7-28)$$

где P_k — потери короткого замыкания трансформатора, Вт;

S — номинальная мощность трансформатора, кВ · А.

Для трехобмоточного трансформатора S — наибольшая из мощностей трех обмоток (100%); для автотрансформатора $S = S_{\text{тип}}$ — типовая мощность, если нужно получить расчетное значение $u_{a.p}$ и $S = S_{\text{прох}}$ — проходная мощность, если нужно получить сетевое значение $u_{k.c}$.

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, V , может быть записана так: $U_p = x_k I_n$, где $x_k = x_1 + x_2'$ — реактивное сопротивление короткого замы-

кания трансформатора, приведенное к одной из его обмоток. Выражая реактивную составляющую напряжения в процентах, получаем:

$$u_p = \frac{x_k I_n}{U_n} 100. \quad (7-29)$$

Из общей теории трансформаторов известно, что реактивное сопротивление трансформатора для простейшего случая взаимного расположения concentрических обмоток по рис. 7-5 при равной высоте обмоток и равномерном распределении витков по их высоте может быть выражено в виде (7-30):

$$x_k = \frac{7,92 f \omega^2 \pi d_{12}}{l} a_p k_p \cdot 10^{-8}. \quad (7-30)$$

Это выражение учитывает только продольное (осевое) поле рассеяния обмоток, предполагая все индукционные линии в пределах высоты обмотки прямыми, параллельными оси обмотки. Отклонение индукционных линий от этого направления вблизи торцов обмотки учитывается коэффициентом k_p :

Подставив x_k в выражение (7-29) и заменив в этом выражении U_n на $u_{B\omega}$, получим:

$$u_p = \frac{7,92 f \omega l \pi d_{12} a_p k_p}{u_{B\omega}} 10^{-6}. \quad (7-31)$$

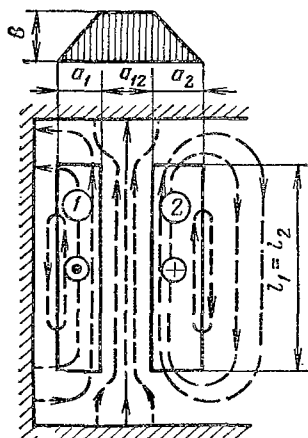


Рис. 7-5. Поле рассеяния двух concentрических обмоток.

Отношение $\pi d_{12}/l = \beta$ является одним из основных соотношений, определяющих распределение активных материалов в трансформаторе. Введя это обозначение и заменив в числителе выражения (7-31) число витков $w = U_H/u_B$, получим:

$$u_p = \frac{7,92 f S' \beta a_p k_p}{u_B^2} 10^{-3}. \quad (7-32)$$

Ширина приведенного канала рассеяния a_p , см, в (7-30) — (7-32) в тех случаях, когда радиальные размеры обмоток a_1 и a_2 равны или мало отличаются друг от друга (в трансформаторах мощностью $S \leq 10\,000$ кВ·А), может быть принята равной:

$$a_p \approx a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}.$$

При расчете трансформаторов мощностью от 10 000 кВ·А следует учитывать неравенство размеров a_1 и a_2 и определять a_p по формуле

$$a_p = \frac{d_{12} a_{12} + D_{ср1} \frac{a_1}{3} + D_{ср2} \frac{a_2}{3}}{d_{12}},$$

где d_{12} — средний диаметр канала между обмотками, см;

$D_{ср1}$ и $D_{ср2}$ — средние диаметры обмоток, см.

При подсчете u_p по (7-31) и (7-32), а также при всех дальнейших расчетах следует пользоваться реальными размерами рассчитанных обмоток трансформатора (a_1 , a_2 , a_{12} , d_{12} , l), а не приближенными значениями β и a_p , найденными при определении основных размеров трансформатора. Весь расчет напряжения короткого замыкания проводится для одного стержня трансформатора. Поэтому при пользовании формулами для определения u_p при расчете как трехфазного, так и однофазного трансформатора следует подставлять в эти формулы номинальные ток, напряжение и мощность, а также число витков обмотки одного стержня.

Коэффициент k_p , учитывающий отклонение реального потока рассеяния от идеального параллельного потока, вызванное конечным значением осевого размера обмоток l по сравнению с их радиальными размерами

(a_{12}, a_1, a_2) , для случая расположения обмоток по рис. 7-5 может быть подсчитан по формуле

$$k_p \approx 1 - \sigma(1 - e^{-1/\sigma}), \quad (7-33)$$

где

$$\sigma = \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi l}.$$

Обычно k_p при концентрическом расположении обмоток колеблется в пределах от 0,93 до 0,98. В реальных трансформаторах равномерное распределение витков по высоте обеих обмоток соблюдается не всегда.

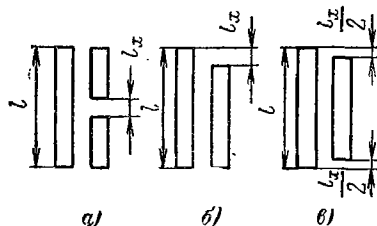


Рис. 7-6. Различные случаи взаимного расположения обмоток трансформатора.

Несоблюдение равномерного распределения витков по высоте обеих обмоток приводит к тому, что через часть витков обмотки ВН не проходит ток нагрузки. Чаще всего регулировочные витки располагаются в середине высоты обмотки стержня (рис. 7-6, а) и в редких случаях — на конце обмотки стержня (рис. 7-6, б). В отдельных случаях (обычно для трансформаторов с мощностью 100—160 кВ·А) допускают применение обмоток разной высоты (рис. 7-6, в). Во всех этих трех случаях реальная обмотка трансформатора может быть разложена на две фиктивные обмотки, создающие в сумме то же поле рассеяния, что и реальная обмотка. Такое разложение обмотки, выполненной по рис. 7-6, а, показано на рис. 7-7.

Реальное поле рассеяния в этом случае может быть в упрощенном виде представлено в виде суммы двух полей: продольного, созданного полным числом витков обмоток с током, и поперечного, вызванного током витков, нескомпенсированных вследствие разности высот обмоток. Показанное на рис. 7-7 распределение индукции поперечного поля рассеяния является приближенным. Оно не учитывает поперечной составляющей вблизи торцов обмотки и взаимного влияния различных частей обмотки и их зеркальных изображений в ферромагнитной поверхности стержня. Использование этой

приближенной картины поля для внесения поправки в расчет u_p возможно потому, что сама эта поправка для концентрических обмоток составляет не более 3—5% от u_p .

Анализ этого и других случаев взаимного расположения обмоток показывает, что реактивное сопротивление обмоток в этих частных случаях распределения витков по высоте может приближенно определяться по формуле

$$x_k = x'_k k_q, \quad (7-34)$$

где x'_k — находят по формуле (7-30) без учета неравномерного распределения витков по высоте; k_q — коэффициент, приближенно определяемый по формуле

$$k_q = 1 + \frac{l_x^2}{m a_p k_p}, \quad (7-35)$$

где $x = l_x/l$ (l_x и l по рис. 7-6).

При определении x следует считать, что трансформатор работает на средней ступени напряжения ВН. Значения m можно принять равными: $m=3$ для рис. 7-6, а и в; $m=0,75$ для рис. 7-6, б.

Для трансформаторов с регулированием напряжения в пределах до 10% при расположении регулиро-

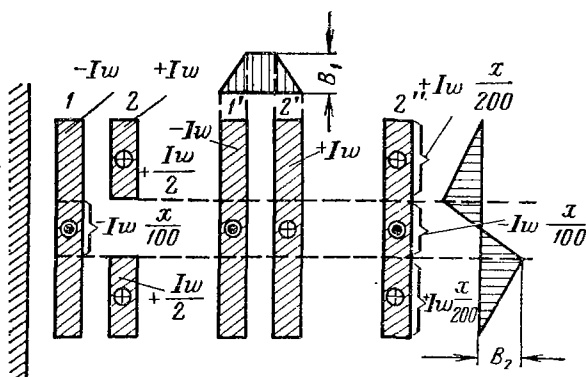


Рис. 7-7. Разложение реальной обмотки с выключением витков в середине высоты на две фиктивные обмотки.

вочных витков по рис. 7-6, *a* или *b* значения k_q обычно получаются в пределах от 1,01 до 1,06.

Подобно x_k определяется в этих случаях и реактивная составляющая напряжения короткого замыкания по формуле

$$u_p = u'_p k_q, \quad (7-36)$$

где u'_p находят по формуле (7-31) или (7-32).

После определения активной и реактивной составляющих напряжение короткого замыкания трансформатора может быть найдено по формуле

$$u_k = \sqrt{u_a^2 + u_p^2}. \quad (7-37)$$

Расчет напряжения короткого замыкания для трехобмоточного трансформатора ведется в том же порядке, как и для двухобмоточного. При этом определяются u_a , u_p и u_k для всех возможных сочетаний трех обмоток, а именно ВН—СН, ВН—НН и СН—НН. При определении u_p для внутренней (*III*) по рис. 7-4 и наружной (*I*) обмоток в a_p в качестве изоляционного промежутка между наружной и средней обмотками a_{13} включаются: ширина a_{12} канала между наружной и средней обмотками, ширина a_2 средней обмотки и ширина a_{23} канала между средней и внутренней обмотками. В этом случае

$$a_p = a_{12} + a_2 + a_{23} + \frac{a_1 + a_3}{3}$$

или для трансформаторов мощностью 10 000 кВ·А и более

$$a_p = \frac{d_{13}(a_{12} + a_2 + a_{23}) + D_{ср1} \frac{a_1}{3} + D_{ср3} \frac{a_3}{3}}{d_{13}},$$

где $d_{13} = D_{ср3} + a_3 + a_{23} + a_2 + a_{12}$ (по рис. 7-4).

Определение a_p для сочетаний обмоток *I—II* и *II—III* ведется как для двухобмоточного трансформатора. Во всех случаях, даже если одна или две обмотки рассчитаны на мощность 67% заданной мощности трансформатора, в (7-32) следует подставлять мощность S' , определяемую для обмотки стержня, имеющей наибольшую мощность (100%).

При расчете двухобмоточного автотрансформатора его расчетные значения u_a , u_p и u_k определяются так же, как и для двухобмоточного трансформатора, по реальным размерам обмоток и типовой мощности автотрансформатора. Эти же параметры, отнесенные к сети, определяются по расчетным значениям путем умножения их на «коэффициент выгодности» (§ 3-2), например,

$$u_{k.c} = u_{k.p} k_v.$$

Расчет напряжения короткого замыкания и его составляющих для автотрансформатора, имеющего третью обмотку с трансформаторной связью с первой и второй обмотками, производится так же, как и для трехобмоточного трансформатора, с учетом особенностей расчета автотрансформаторов для обмоток, имеющих автотрансформаторную связь.

Напряжение короткого замыкания должно совпадать с u_k , регламентированным ГОСТ или заданным в технических условиях (задании) на проект трансформатора. Согласно ГОСТ 11677-75 напряжение короткого замыкания готового трансформатора может отличаться от гарантийного значения не более чем на $\pm 10\%$. При изготовлении трансформатора вследствие возможных отклонений в размерах обмоток (в частности, в размерах a_1 , a_2 и d_{12}), лежащих в пределах нормальных производственных допусков, u_k готового трансформатора может отличаться от расчетной величины на $\pm 5\%$. Для того чтобы отклонение u_k у готового трансформатора не выходило за допустимый предел ($\pm 10\%$ гарантийной величины), рекомендуется при расчете трансформатора не допускать отклонений в расчетном значении напряжения короткого замыкания более чем $\pm 5\%$ гарантийного значения u_k .

В тех случаях, когда полученное значение u_k отклоняется более чем на $\pm 5\%$ от заданного, изменение в нужном направлении лучше всего вести за счет изменения его реактивной составляющей. Небольших изменений u_p (7-31) и (7-32) можно достигнуть, изменяя a_p (за счет изменения a_{12}) или l . Более резкое изменение u_k достигается изменением э. д. с. одного витка и числа витков, которое может быть достигнуто путем увеличения или уменьшения диаметра стержня или индукции в нем B_c .

7-3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СИЛ В ОБМОТКАХ И НАГРЕВА ОБМОТОК ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Процесс короткого замыкания трансформатора, являющийся аварийным режимом, сопровождается многократным увеличением токов в обмотках трансформатора по сравнению с номинальными токами, повышенным нагревом обмоток и ударными механическими силами, действующими на обмотки и их части. Проверка обмоток на механическую прочность при коротком замыкании включает:

- 1) определение максимального тока короткого замыкания трансформатора;
- 2) определение механических сил между обмотками и их частями;
- 3) определение механических напряжений в изоляционных опорных и междукатушечных конструкциях и в проводах обмоток;
- 4) определение температуры обмоток при коротком замыкании.

Действующее значение установившегося тока короткого замыкания определяется согласно ГОСТ 11677-75 с учетом сопротивления питающей сети

$$I_{к.у} = \frac{100 I_n}{u_k \left(1 + \frac{100 S_n}{u_k S_k} \right)}, \quad (7-38)$$

где I_n — номинальный ток соответствующей обмотки, А;
 S_n — номинальная мощность трансформатора, МВ·А;
 S_k — мощность короткого замыкания электрической сети по табл. 7-2, МВ·А;
 u_k — напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Действующее значение установившегося тока короткого замыкания иногда определяется по формуле (если принять $S_k = \infty$)

$$I_{к.у} = I_n \frac{100}{u_k},$$

где I_n — номинальный ток соответствующей обмотки, катушки или витка.

**Определение мощности короткого замыкания электрической
сети к формуле (7-38) $S_{к}$**

Класс напряжения ВН, кВ	(—10	10—35	110	150	220	330	500
Мощность ко- роткого замыка- ния электрической сети, МВ·А	500	2500	15 000	20 000	25 000	35 000	50 000

В трехобмоточных трансформаторах каждая обмотка связана с двумя другими обмотками различными напряжениями короткого замыкания $u_{к}$. В (7-38) для каждой обмотки следует подставлять меньшее из двух значений $u_{к}$. Для автотрансформаторов в (7-38) следует подставлять сетевое значение $u_{к.с}$.

В начальный момент ток короткого замыкания вследствие наличия апериодической составляющей может значительно превысить установившийся ток и вызвать механические силы между обмотками, превышающие в несколько раз силы при установившемся токе короткого замыкания. Согласно общей теории трансформаторов это мгновенное максимальное значение тока короткого замыкания определяется по формуле

$$i_{к.м} = 1,41 k_m I_{к.у}, \quad (7-39)$$

где k_m — коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую тока короткого замыкания, определяемый по формуле

$$k_m = 1 + e^{-\pi u_s / u_p}. \quad (7-40)$$

Наибольшую опасность при коротком замыкании представляют для обмоток трансформатора механические силы, возникающие между обмотками и их частями. Их необходимо учитывать при расчете и конструировании трансформатора, в противном случае они могут привести к разрушению обмотки, к деформации или разрыву витков или к разрушению опорных конструкций.

Механические силы возникают в результате взаимодействия тока в обмотке с магнитным полем рассеяния. Расчет сил, так же как и расчет потоков рассеяния,

представляет весьма сложную задачу. Эта задача еще осложняется тем, что обмотки трансформатора не являются монолитными в механическом отношении. Конструктивно каждая обмотка трансформатора состоит из проводников, разделенных витковой изоляцией в виде обмотки из кабельной бумаги или пряжи и в некоторых видах обмоток междуслойной изоляцией — прослойками из кабельной бумаги или картона. Между катушками, а в некоторых обмотках и между витками, размещаются прокладки, набранные из электроизоляционного картона. Механические силы, возникающие при коротком замыкании и действующие на проводники обмотки, неравномерно распределяются между ее витками. Суммируясь, они создают силы, действующие на междукатушечную и опорную изоляцию обмоток, на рейки, образующие вертикальные каналы, и на изоляционные цилиндры. Поскольку максимальные механические силы при коротком замыкании действуют в течение очень короткого промежутка времени, упругость витковой и междукатушечной изоляции может весьма существенно повлиять на суммарные силы, и их максимальное значение может оказаться значительно меньшим, чем арифметическая сумма элементарных сил. Это смягчающее действие изоляции обмотки не может быть учтено, так как упругость изоляции во многом зависит от факторов, не поддающихся точному учету (плотности намотки витков, степени пропитки обмотки лаком, усадки изоляции после сушки и т. д.). С другой стороны, упругость изоляции облегчает возникновение собственных механических колебаний проводов обмотки, что может привести к увеличению механических напряжений и способствовать разрушению обмоток.

Для упрощения задачи при расчетах трансформаторов обычно производится проверочное определение суммарных механических сил, действующих на всю обмотку по полному потоку рассеяния или по полному току обмотки. Обмотка при этом считается монолитной в механическом отношении. Механические силы, которые определяются при таком расчете, являются в известной мере условными, однако расчет этих сил позволяет практически правильно оценить общую механическую прочность трансформатора при коротком замыкании.

Сила, действующая на каждый провод витка, зависит от тока этого провода, который в большинстве об-

моток можно считать одинаковым для всех проводов данной обмотки, и индукции поля рассеяния в месте нахождения провода, которая будет различной для различных проводов, расположенных в разных частях обмотки. Рассматривая в совокупности всю обмотку как монолитное тело и все поле рассеяния, можно найти суммарные силы, действующие на обмотку в осевом и радиальном направлениях, и получить общее приближенное представление о механической прочности обмотки, что в ряде случаев дает представление о силах несколько больших, чем суммарные силы, возникающие в реальной обмотке.

При рассмотрении суммарных сил, действующих на обмотки, обычно раздельно оценивают силы осевые, т. е. сжимающие обмотку в осевом направлении, и силы радиальные, растягивающие внешнюю обмотку и изгибающие провода внутренней обмотки. Осевые силы оказывают давление на междукатушечную, междувитковую и опорную изоляцию обмотки, для которой должна быть обеспечена прочность на сжатие. Прочность металла проводов при сжатии в этом случае считается достаточной. Оценка осевых сил по полному току обмотки дает приближенную картину механических воздействий осевых сил. Более точное представление об осевых силах, действующих на отдельные части обмотки, может быть получено только при учете распределения индукции поля рассеяния в данной обмотке.

Радиальные силы оказывают различное воздействие на наружную и внутреннюю обмотки. Они наиболее опасны для проводов внутренней обмотки, испытывающих сжатие и изгибающихся под действием радиальных сил в пролетах между рейками, на которых намотана обмотка. Нарушение равновесия обмотки и разрушение ее возможны, как вследствие изгиба провода в пролетах между рейками (см. рис. 7-9, б), так и вследствие потери устойчивости (см. рис. 7-9, в). При расчете механической прочности и устойчивости внутренней обмотки необходимо найти провода, испытывающие наибольшие силы, и учитывать действие на эти провода как радиальных, так и осевых сил.

Задача расчета механических сил, возникающих в обмотках трансформатора при коротком замыкании, является чрезвычайно сложной, и ее решение простыми средствами с определением суммарных сил, действующих

щих на обмотку позволяет произвести лишь общую приближенную оценку механической прочности и устойчивости обмоток. Достаточно точное решение требует определения продольной и поперечной составляющих индукции поля рассеяния по крайней мере для осевых линий сечения каждой обмотки (§ 7-4) и находится путем расчета по сравнительно сложным методикам для осевых и радиальных сил во внутренних и наружных обмотках.

Исследование механических сил, возникающих в обмотках трансформатора при коротком замыкании, и разработка методик расчета этих сил в последние годы выполнены во Всесоюзном электротехническом институте имени В. И. Ленина. Описание этих методик приведено в статьях, указанных в списке литературы, их материал частично использован в настоящем параграфе.

Задачей расчетчика является не только расчет или оценка сил, действующих на витки обмоток или целые обмотки, но также и обеспечение конструктивных мер, направленных на уменьшение возможных механических сил, возникающих в отдельных частях обмоток. К числу этих мер относятся — равномерное распределение витков по высоте каждой из обмоток, выполнение всех обмоток стержня с одной высотой, симметричное расположение всех отключаемых витков обмоток ВН по отношению к середине высоты обмотки. Следует иметь в виду, что винтовые обмотки, особенно имеющие два и большее число ходов, при равной высоте с катушечными вследствие винтового хода крайних витков фактически имеют меньшую высоту, чем катушечные. Для этих обмоток рекомендуется крайние витки укладывать в плоскости, перпендикулярной к оси обмотки, а в двухходовых обмотках сдвигать начала (и концы) по окружности на 180° . Регулировочные витки обмоток ВН рекомендуется располагать по рис. 6-6, б—г или по рис. 6-9.

Для определения суммарных радиальных сил рассмотрим изображенный на рис. 7-8 простейший случай взаимного расположения обмоток трансформатора. Обе обмотки имеют равные высоты и равномерное распределение витков по высоте. Показано также распределение магнитных линий поля рассеяния. Это поле рассеяния может быть представлено в виде суммы двух полей:

продольного, линии которого направлены параллельно оси обмотки, и поперечного, линии которого расходятся радиально. Распределение индукции того и другого полей показано на рис. 7-8. Наличие поперечного поля объясняется конечным соотношением высоты обмотки l и ее суммарной ширины $(a_1 + a_2)$. Чем выше и уже обмотка, тем меньше поперечное поле.

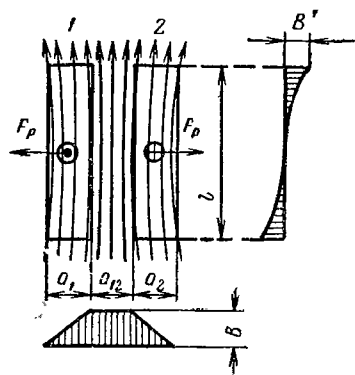


Рис. 7-8. Продольное и поперечное поля в концентрической обмотке.

Определение механических сил в обмотке будем вести рассчитывая отдельно силы, вызванные тем и другим полями. Рассмотрим наружную обмотку 2. При показанном на рис. 7-8 направлении тока в ней механическая сила F_p будет направлена в радиальном направлении вправо, стремясь оттолкнуть обмотку 2 от левой обмотки 1.

Эта сила, Н,

$$F_p = B_{cp} i_{к-м} w l_v \cdot 10^{-2}, \quad (7-41)$$

где B_{cp} — средняя индукция продольного поля, Т;
 w — число витков обмотки;
 l_v — средняя длина витка, см.

В свою очередь индукция

$$B_{cp} = \frac{0,4 \pi i_{к-м} w k_p}{2l} 10^{-4}, \text{ Т.} \quad (7-42)$$

Подставляя это значение в (7-41) и принимая, что $l_v/l = \beta$, получаем:

$$F_p = 0,628 (i_{к-м} w)^2 \beta k_p \cdot 10^{-6}, \quad (7-43)$$

где w — полное число витков одной из обмоток (для обмотки ВН на средней ступени);

$i_{к-м}$ — мгновенное максимальное значение тока этой обмотки при коротком замыкании, найденное по (7-39).

Эта формула дает суммарную радиальную силу, Н, действующую на наружную обмотку и стремящуюся

растянуть ее. Такая же, но направленная прямо противоположно сила действует на внутреннюю обмотку, стремясь сжать ее. Обе эти силы равномерно распределены по окружности обеих обмоток, как это показано на рис. 7-9, а.

Суммарная осевая сила при расположении обмоток по рис. 7-8 может быть рассчитана на основании следующих соображений.

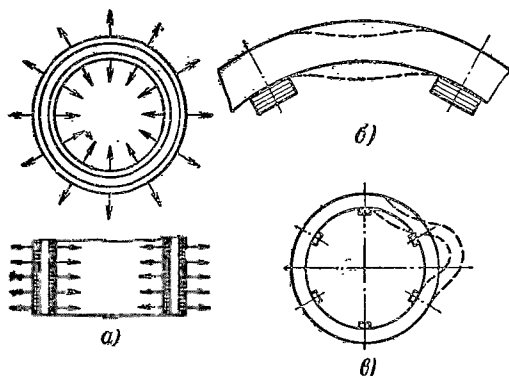


Рис. 7-9. Действие радиальных сил на концентрические обмотки.

а — распределение сил; б — деформация внутренней обмотки при изгибе; в — потеря устойчивости внутренней обмотки.

Поперечное поле рассеяния, направления которого для рассмотренного случая в верхней и нижней половинах обмотки 2 прямо противоположны, вызывает в верхней половине обмотки 2 силу, направленную вниз, а в нижней половине — направленную вверх. Таким образом, эти силы F'_{oc} сжимают обмотку 2 в осевом направлении. Нетрудно показать, что силы, вызванные поперечным полем в обмотке 1, также сжимают эту обмотку в осевом направлении.

Поперечное поле рассеяния имеет сложный характер. Расчет этого поля и сил, им вызванных, производится с меньшей точностью, чем для продольного поля. При этом более точно рассчитываются суммарные силы и значительно менее точно силы, действующие на отдельные витки и катушки.

Осевая сила F'_{oc} может быть определена по (7-43), если в нее подставить: B'_{cp} — среднюю индукцию поперечного поля; $\omega/2$ — половину числа витков одной из обмоток вместо ω . Подробный анализ поперечного поля рассеяния для этого случая показывает, что средняя ин-

дукция $B'_{\text{ср}}$ может быть приближенно выражена через среднюю индукцию продольного поля при помощи простого соотношения

$$B'_{\text{ср}} = B_{\text{ср}} a_p / l, \quad (7-44)$$

где

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}.$$

Тогда осевая сила, H , выразится

$$\begin{aligned} F'_{\text{ос}} &= \frac{0,4\pi i_{\text{к.м}} w k_p}{2l} \frac{a_p}{l} i_{\text{к.м}} \frac{w}{2} l_B \cdot 10^{-6} = \\ &= 0,628 \frac{(i_{\text{к.м}} w)^2 l_B k_p}{l} 10^{-6} \frac{a_p}{2l}. \end{aligned}$$

Сравнивая $F'_{\text{ос}}$ с (7-43), получаем:

$$F'_{\text{ос}} = F_p a_p / 2l. \quad (7-45)$$

Осевая сила $F'_{\text{ос}}$ является суммой элементарных осевых сил, приложенных к отдельным проводникам обмотки и направленных вниз в верхней половине и вверх в нижней половине каждой из обмоток. Максимального значения $F'_{\text{ос}}$ достигает на середине высоты обмотки. Осевые силы действуют на междукатушечную и междувитковую изоляцию, которая должна быть проверена на сжатие. В цилиндрических обмотках осевые силы могут вызвать сползание крайних витков внешнего слоя, если они укреплены недостаточно прочно.

Кроме осевых сил, возникающих при коротком замыкании, в обмотке трансформатора при его сборке путем затяжки прессующих приспособлений создаются осевые силы прессовки с напряжением на изоляции от 2 до 10 МПа. Эти силы необходимы для того, чтобы в процессе механических воздействий между катушками или витками и изоляционными деталями не образовывались зазоры, приводящие к механическим ударам при прекращении воздействия сил короткого замыкания.

Равномерное распределение витков по высоте обеих обмоток в трансформаторах встречается только при применении на стороне ВН многослойных цилиндрических обмоток, когда отключаемые регулировочные витки располагаются по высоте всего наружного слоя обмотки так,

как показано на рис. 6-6, б. Во всех остальных случаях регулировочные витки выделяются в особые катушки, чаще всего располагаемые в середине высоты обмотки. Отключение этих катушек приводит к нарушению равномерности распределения витков по высоте обмотки. В этом случае (рис. 7-10) поле рассеяния трансформатора может быть представлено в виде суммы трех полей: известного уже продольного поля с индукцией B ; поперечного поля, вызванного конечным соотношением высоты

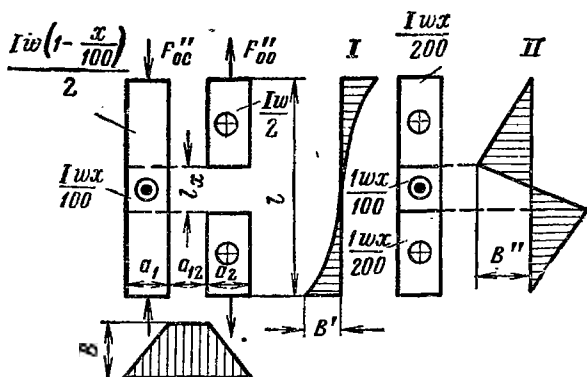


Рис. 7-10. Разложение поля рассеяния на три составляющие.

и ширины обмоток, с индукцией B' и второго поперечного поля, вызванного фиктивной обмоткой II, с индукцией B'' и числом витков $xw/100$, где x — выраженный в процентах незаполненный витками разрыв в обмотке ВН. Следует заметить, что, строго говоря, треугольная форма кривой B относится не к индукции, а к м. д. с. поперечного поля.

Находим в этом случае, что силы, вызванные вторым поперечным полем F''_{oc} , направлены параллельно вертикальной оси обмоток. Они стремятся увеличить имеющуюся несимметрию в расположении витков обмоток, сжимают внутреннюю и растягивают наружную обмотку, прижимая ее к верхнему и нижнему ярмам. Сила F''_{oc} может быть определена по (7-41), если положить:

$$B_{cp} = \frac{0,4\pi i_{к.м} \frac{wx}{200} k_p'' \cdot 10^{-4}}{2a_2};$$

$$l = l_B; \quad i = i_{к.м};$$

число витков $\omega = \omega_{\text{обм}}/2$,

где $\omega_{\text{обм}}$ — полное число витков той из обмоток, для которой подсчитан ток $i_{\text{к.м}}$;

k_p'' — коэффициент приведения для поперечного поля,

$$F_{\text{ос}}'' = \frac{0,4\pi i_{\text{к.м}} \omega x k_p''}{2 \cdot 200 a_2} i_{\text{к.м}} \frac{\omega}{2} l_{\text{в}} \cdot 10^{-6}.$$

Заменяя a_2/k_p'' средней приведенной длиной индукционной линии поперечного поля l'' и $x = \frac{l_x}{l}$, получаем:

$$F_{\text{ос}}'' = 0,628 \frac{(i_{\text{к.м}} \omega)^2}{l} l_{\text{в}} \frac{l_x}{l'' \cdot 4} \cdot 10^{-6}. \quad (7-46)$$

Первая дробь выражения (7-46) отличается от (7-43) для радиальной силы F_r только отсутствием множителя k_p для продольного поля. Вследствие этого осевая сила $F_{\text{ос}}''$ может быть выражена через F_r следующим образом:

$$F_{\text{ос}}'' = F_r \frac{l_x}{l'' k_p m}. \quad (7-47)$$

Подобно предыдущему осевые силы $F_{\text{ос}}''$ могут быть определены также и для некоторых других случаев взаимного расположения обмоток, показанных на рис. 7-11. Анализ показывает, что и для этих случаев может быть применена формула (7-47) при различных значениях постоянного множителя m . На рис. 7-11 приведены значения m , а также показано расположение точек сосредоточения максимальных сжимающих осевых сил $F_{\text{сж}}$ по высоте обмоток НН и ВН (1 и 2) и указаны эти силы. Пользуясь этими данными, можно определить максимальное значение осевых сил в междукатушечной (междувитковой для винтовых обмоток) изоляции, а также давление обмотки на ярмо. Основные данные для $F_{\text{сж}}$ на рис. 7-11 приведены в предположении, что $F_{\text{ос}}'' > F_{\text{ос}}'$. В отдельных случаях может оказаться, что $F_{\text{ос}}'' > F_{\text{ос}}'$. Тогда распределение сил в обмотках может измениться и будет таким, как это показано в правой части рис. 7-11. Осе-

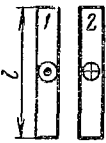
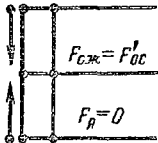
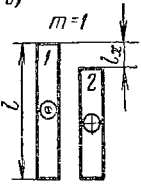
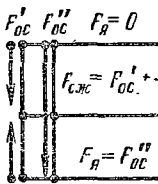
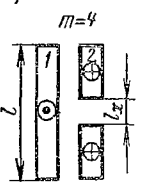
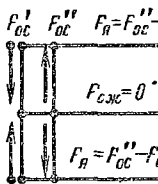
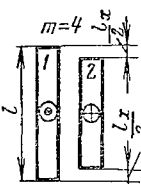
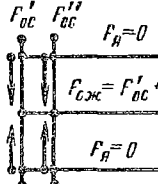
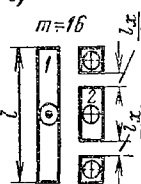
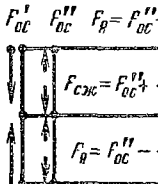
	«лучай» $-F_{oc}' > F_{oc}''$		Другие случаи
	Обмотка 1	Обмотка 2	
а)	 $F_{oc}' F_{oc}'' = 0 \quad F_R = 0$ $F_{cж} = F_{oc}'$ $F_R = 0$	 $F_{oc}' F_{oc}'' = 0 \quad F_R = 0$ $F_{cж} = F_{oc}'$ $F_R = 0$	
б)	 $F_{oc}' F_{oc}'' F_R = F_{oc}''$ $F_{cж} = F_{oc}' + \frac{F_{oc}''}{2}$ $F_R = 0$	 $F_{oc}' F_{oc}'' F_R = 0$ $F_{cж} = F_{oc}' + \frac{F_{oc}''}{2}$ $F_R = F_{oc}''$	
в)	 $F_{oc}' F_{oc}'' F_R = 0$ $F_{cж} = F_{oc}' + F_{oc}''$ $F_R = 0$	 $F_{oc}' F_{oc}'' F_R = F_{oc}'' - F_{oc}'$ $F_{cж} = 0$ $F_R = F_{oc}'' - F_{oc}'$	Обмотка 2 $F_{oc}' > F_{oc}''$ $F_R = 0$ $F_{cж} = F_{oc}' - F_{oc}''$ $F_R = 0$
г)	 $F_{oc}' F_{oc}'' F_R = F_{oc}'' - F_{oc}'$ $F_{cж} = 0$ $F_R = F_{oc}'' - F_{oc}'$	 $F_{oc}' F_{oc}'' F_R = 0$ $F_{cж} = F_{oc}' + F_{oc}''$ $F_R = 0$	Обмотка 1 $F_{oc}' > F_{oc}''$ $F_R = 0$ $F_{cж} = F_{oc}' - F_{oc}''$ $F_R = 0$
д)	 $F_{oc}' F_{oc}'' F_R = 0$ $F_{cж} = F_{oc}'' + \frac{F_{oc}'}{2}$ $F_{cж} = F_{oc}' + \frac{F_{oc}''}{2}$ $F_{cж} = F_{oc}'' + \frac{F_{oc}'}{2}$ $F_R = 0$	 $F_{oc}' F_{oc}'' F_R = F_{oc}'' - \frac{F_{oc}'}{2}$ $F_{cж} = F_{oc}'' + \frac{F_{oc}'}{2}$ $F_R = F_{oc}'' - \frac{F_{oc}'}{2}$	Обмотка 2 $\frac{F_{oc}'}{2} > F_{oc}''$ $F_R = 0$ $F_{cж} = F_{oc}'$ $F_R = 0$

Рис. 7-11. Распределение сжимающих осевых сил для различных случаев взаимного расположения обмоток.

вые силы в значительной мере зависят от того, на какой ступени напряжения работает трансформатор, т. е. от разрыва в обмотке l_x . Наиболее неблагоприятным является случай работы на низшей ступени напряжения при наибольшем l_x . Поэтому l_x должно определяться как расстояние (измеренное в сантиметрах) между крайними витками с током при работе трансформатора на низшей

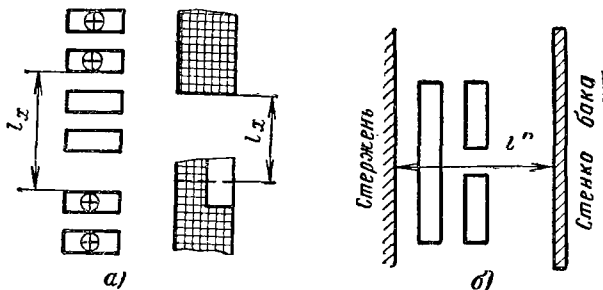


Рис. 7-12. К расчету осевых сил.

а — определение l_x ; б — приближенное определение l'' .

ступени обмотки ВН (рис. 7-12, а). При выводе (7-47) для определения F''_{oc} в тех случаях, когда разрыв в обмотке разделен на две части (случаи рис. 7-11, г и д) за l_x принята сумма высот обоих разрывов.

После определения F_p , F'_{oc} и F''_{oc} следует найти максимальное значение сжимающей силы в обмотке $F_{сж}$ и силы, действующей на ярмо, $F_{я}$. Для определения этих сил можно воспользоваться рис. 7-11. По силе, действующей на ярмо, в случае необходимости может быть проверена механическая прочность опорных конструкций обмотки — прессующих балок ярма, деревянных опорных брусков и т. д. По максимальной сжимающей силе проверяется прочность междукатушечной (междувитковой) изоляции. В случае, если сила, действующая на ярмо, $F_{я}$ оказывается больше сжимающей силы $F_{сж}$, проверку междукатушечной изоляции на сжатие проводят по $F_{я}$.

Для определения средней приведенной длины индукционной линии поперечного поля рассеяния $l'' = a_2/k''_p$ следует найти значение коэффициента k''_p для поперечного поля. Приблизительно значение l'' может быть определено в предположении, что поперечное поле рассеяния

замыкается через стержень и стенку бака (рис. 7-12, б), как расстояние от поверхности стержня трансформатора до стенки бака.

Для оценки механической прочности обмотки обычно определяют напряжение на разрыв в проводе обмотки и напряжение сжатия в прокладках междукатушечной (междувитковой) и опорной изоляции обмоток.

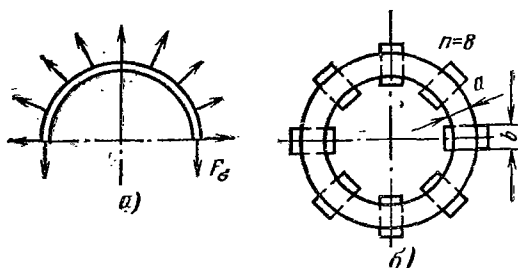


Рис. 7-13. К определению механических напряжений в обмотках.

а — силы, разрывающие обмотку; б — опорные поверхности обмотки.

Для определения напряжения на разрыв находится сила, разрывающая обмотку, по рис. 7-13, а. Эта сила F_{σ} условно рассматривается как статическая:

$$F_{\sigma} = F_p / 2\pi. \quad (7-48)$$

Напряжение на разрыв, МПа, в проводе обмоток определяется по формуле

$$\sigma_p = F_{\sigma} / w\P, \quad (7-49)$$

где w — число витков обмотки (катушки), для которого определена сила;

Π — площадь поперечного сечения одного витка, мм².

Полученное условное среднее статическое напряжение для медных обмоток трансформаторов мощностью до 6300 кВ·А должно удовлетворять неравенству $\sigma_p \leq \leq 50 \div 60$ МПа. Для трансформаторов мощностью до 1600 кВ·А σ_p обычно получается не более 30—40 МПа. Для трансформаторов мощностью более 6300 кВ·А условное статическое напряжение σ_p допускается до 100—150 МПа.

В алюминиевых обмотках трансформаторов мощностью до 6300 кВ·А напряжение $\sigma_{\text{сж}}$ допускается в пределах до 22—25 МПа.

Осевые сжимающие силы воспринимаются обычно междукатушечными прокладками и опорными прокладками из электроизоляционного картона. Опорные поверхности, воспринимающие осевые силы, ограничены на рис. 7-13, б штриховыми линиями.

Напряжения сжатия на опорных поверхностях

$$\sigma_{\text{сж}} = F_{\text{сж}}/nab, \quad (7-50)$$

где n — число прокладок по окружности обмотки;
 a — радиальный размер обмотки, мм;
 b — ширина прокладки, мм.

Напряжение $\sigma_{\text{сж}}$, определяемое по формуле (7-50), должно удовлетворять неравенству $\sigma_{\text{сж}} \leq 18 \div 20$ МПа для трансформаторов мощностью до 6300 кВ·А и $\sigma_{\text{сж}} \leq 35 \div 40$ МПа для трансформаторов больших мощностей. В (7-50) следует подставить максимальное значение сжимающей осевой силы $F_{\text{сж}}$, определяя ее по рис. 7-11. В тех случаях, когда $F_{\text{я}} > F_{\text{сж}}$, следует подставлять в эту формулу силу $F_{\text{я}}$.

В том случае, когда обмотка НН винтовая без радиальных каналов с плотным прилеганием витков или многослойная цилиндрическая, а обмотка ВН многослойная цилиндрическая, возможен достаточно точный расчет осевых сил по упрощенному методу, учитывающему реальное для таких обмоток распределение индукции поля рассеяния [Л. 9].

Осевая сила, H , рассчитывается по формуле

$$F_{\text{ос}} = 7,5d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2} \right) (i_{\text{к.м}} w)^2 \frac{1}{l^2} K \cdot 10^{-6}; \quad (7-51)$$

в этой формуле K — коэффициент осевой силы:

$$K = \Delta_1 k_{01} + \Delta_2 k_{02}, \quad (7-52)$$

где k_{01} — коэффициент, определяемый по формуле

$$k_{01} = 0,33 - 1,15 a_0/l; \quad (7-53)$$

где $a_0 = a_{12} + a_1 + a_2$, см;

Δ_1 определяется по табл. 7-3; $\Delta_2 = 100/n$; n — число слоев обмотки ВН.

Значение Δ_1 в формуле (7-52)

Мощность, кВ·А	Тип обмотки НН	Δ_1 , %
25—100	Двухслойная и многослойная и цилиндрическая	$\frac{1,0 \text{ см}}{l} 100$
160—630	То же	$\frac{1,5 \text{ см}}{l} 100$
630—6300	Винтовая с обычным сходом крайних витков по винтовой линии	$\frac{0,5 h_B^*}{l} 100$
630—6300	Винтовая со сглаженным сходом крайних витков	$\frac{1,5 \text{ см}}{l} 100$

* h_B — высота одного витка, см.

Для обмоток с регулировочными витками, симметрично расположенными относительно середины высоты обмоток на каждой ступени (см. рис. 6-6, б), $k_{02}=0$. Для случая, когда наружный слой обмотки содержит 50% витков одного внутреннего слоя и эти витки расположены в верхней или нижней половинах обмотки, k_{02} определяется по табл. 7-4.

В практике проектирования трансформаторов обычно стремятся к ограничению возможных радиальных и осе-

Таблица 7-4

Значения k_{02} для обмотки с наружным слоем, содержащим 0,5 витков одного внутреннего слоя

a_{12}	1 см	2 см	3 см
Медь	0,034	0,030	0,026
Алюминий	0,06	0,05	0,04

вых сил, возникающих в обмотках при коротком замыкании, а также к увеличению механической прочности обмоток.

Ограничение радиальных, а следовательно, и пропорциональных им осевых сил возможно за счет ограничения тока короткого замыкания путем увеличения напряжения короткого замыкания. Это обстоятельство учитывается обычно при установлении стандартных напряжений короткого замыкания. Для уменьшения осевых сил рекомендуется выдерживать одинаковыми осевые размеры всех обмоток трансформатора, располагать регулировочные катушки в середине высоты обмотки, стремиться к уменьшению зоны разрыва в обмотке ВН (или СН), делать несколько увеличенных радиальных каналов в середине обмотки НН против зоны регулирования обмотки ВН.

Особенно велики могут быть силы в обмотках трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой. Для этих трансформаторов рекомендуется выделять регулировочную часть обмотки в отдельный концентр, состоящий из нескольких цилиндрических слоев, каждый из которых образует ступень регулирования (рис. 6-9, а), или представляющий собой винтовую обмотку, где каждая ступень регулирования образуется одним из проводов обмотки (рис. 6-9, б).

В целях увеличения механической прочности при воздействии тока короткого замыкания обмотки обычно пропитываются глифталевым или другими лаками, придающими обмотке после запекания большую механическую монолитность. Этой же цели служат применение в опорной изоляции колец, склеенных из электрокартонных шайб, соединение междукатушечных прокладок внешней рейкой, а также осевая прессовка обмоток при помощи стальных нажимных колец. Нажимные кольца накладываются поверх верхней опорной изоляции обмоток, и осевая прессовка обмоток осуществляется специальными винтами, проходящими через полки верхней ярмовой балки (рис. 7-14). Во избежание образования короткозамкнутого витка стальное кольцо делается разрезным — с одним поперечным разрезом. Применяются также кольца из пластмассы без разреза.

Подпрессовка обмотки особенно необходима в первое время после ввода трансформатора в эксплуатацию, пока междукатушечная и опорная изоляция еще получает остаточные деформации. Нажимные кольца рекомендуется устанавливать на всех трансформаторах с регулированием напряжения без перерыва нагрузки и на нормальных трансформаторах, а также на трансформаторах, служащих для питания дуговых электрических печей, начиная с 1000—1600 кВ·А.

Существенное значение для обеспечения механической прочности обмоток при коротком замыкании имеет технология их изготовления

и обработки. Плотность намотки в радиальном и осевом направлениях должна обеспечиваться достаточным натяжением провода при намотке и осевым, желательно механическим, поджимом наматываемого витка к ранее намотанным. Дальнейшее уплотнение обмотки в осевом направлении производится во время ее сушки в спрессованном состоянии при помощи стальных пружин, или после сушки путем опрессовки силами, близкими к осевым силам при коротком замыкании.

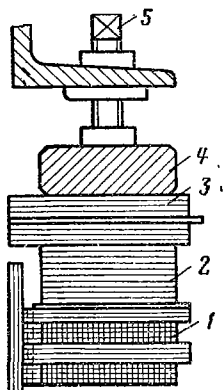


Рис. 7-14. Усиление прессовки обмоток.

1 — обмотка; 2 — опорное кольцо, склеенное из электрокартонных шайб; 3 — ярмовая изоляция; 4 — стальное разрезное кольцо или неразрезное кольцо из стеклопластика; 5 — прессующий винт.

При расчете температуры обмоток при коротком замыкании полагают, что вследствие кратковременности процесса можно не учитывать теплоотдачу от обмотки к маслу (воздуху) и считать, что все тепло, выделяющееся в обмотке, накапливается, повышая ее температуру. Если при расчете температуры обмотки учесть увеличение удельного сопротивления провода с его нагревом, а также теплоемкость металла провода и его изоляции, то, полагая изменение температуры обмотки с изменением времени линейным, можно конечную температуру обмотки ϑ_k , °С, через t_k секунд после возникновения короткого замыкания определить по формулам:

для медных обмоток

$$\vartheta_{KM} = \frac{670t_k}{12,5 \left(\frac{u_k}{\Delta} \right)^2 - t_k} + \vartheta_n; \quad (7-54)$$

для алюминиевых обмоток

$$\vartheta_{KA} = \frac{670t_k}{5,5 \left(\frac{u_k}{\Delta} \right)^2 - t_k} + \vartheta_n; \quad (7-54')$$

Допустимые температуры обмоток при коротком замыкании

Вид охлаждения	Масляное		Воздушное				
	Медь	Алюминий	Медь			Алюминий	
Класс изоляции	A	A	A	E	B, F, H	A	E, B, F, H
Допустимая температура, °C	250	200	180	250	350	180	200

где Δ — плотность тока при номинальной нагрузке, А/мм². За начальную температуру обмотки обычно принимают $\vartheta_n = 90^\circ\text{C}$.

Предельно допустимые температуры обмоток при коротком замыкании, установленные ГОСТ 11677-75, приведены в табл. 7-5. Длительность короткого замыкания можно приближенно принять равной 5 с. Время, в течение которого медная обмотка достигает температуры 250°C ,

$$t_{k250} \approx 2,5 \left(\frac{u_k}{\Delta} \right)^2. \quad (7-55)$$

Время достижения температуры 200°C для алюминиевых обмоток

$$t_{k200} \approx 0,79 \left(\frac{u_k}{\Delta} \right)^2. \quad (7-55')$$

7-4. РАСЧЕТ ИНДУКЦИИ ПОЛЯ РАССЕЯНИЯ

Добавочные потери в витках обмоток трансформатора при нормальной нагрузке и механические силы в отдельных витках или группах витков обмоток при коротком замыкании в пределах одной обмотки существенно зависят от распределения индукции поля рассеяния в пространстве, занимаемом обмотками. Поскольку обмотки трансформатора имеют конечные осевые размеры и м. д. с. могут неравномерно распределяться по сечению обмоток, приходится считаться с неравномерным распределением индукции и возникновением в зоне расположения обмоток значительного поперечного поля.

Точный расчет добавочных потерь и механических сил в витках обмоток возможен только в том случае, если известно распределение индукции поля рассеяния в зоне расположения обмоток. Расчет и построение графиков индукции поля рассеяния является

весьма сложной задачей, обычно решаемой с теми или иными упрощающими допущениями, однако и при этом требующей достаточно сложных и трудоемких расчетов. С теми или иными допущениями эти расчеты и построения теперь выполняются, как правило, при проектировании всех трансформаторов мощностью более 1000—1600 кВ·А.

Один из наиболее простых методов расчета и построения графика индукции поля рассеяния основывается на следующих допущениях: сумма м. д. с. обмоток каждого стержня в любой момент равна нулю; поле рассеяния считается плоскопараллельным; обмотки заменяются тонкими бесконечно длинными параллельными шинами

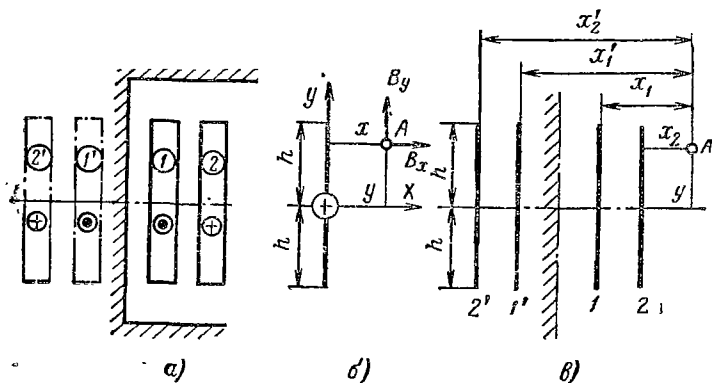


Рис. 7-15. К расчету индукции поля рассеяния.

а — расположение обмоток и зеркальных изображений; б — определение индукции от одной обмотки; в — расчетная схема для двух обмоток.

конечной высоты $2h$; магнитная проницаемость стали принимается равной бесконечности.

Ширина обмотки не учитывается, т. е. $a_1 = a_2 = 0$. При определении осевой и радиальной составляющих индукции в точке А (рис. 7-15, а и б) учитываются м. д. с. реальных обмоток 1 и 2 и их зеркальных изображений на поверхности стержня 1' и 2'. Изображениями обмоток в ярмах и в стенках бака пренебрегаем, так же как и влиянием обмоток соседнего стержня.

Расчетная схема для наиболее частого случая обмоток, симметричных относительно горизонтальной оси, проходящей через середину высоты, показана на рис. 7-15, в. Расчет составляющих индукции B_y и B_x ведется по методу наложения. В данной точке А определяются B_{y1} и B_{x1} , B_{y2} и B_{x2} и т. д. от всех обмоток (1 и 2) и их изображений (1' и 2') и затем алгебраически суммируются с учетом знака в зависимости от направления тока обмотки. Расчет и построение графика ведутся для оси каждой обмотки. При этом для оси обмотки 1 $x_1 = 0$; для оси обмотки 2 $x_2 = 0$. Ордината y изменяется от 0 до h . Точки на оси обмотки рекомендуется выбирать в местах излома линии м. д. с. (границы отключаемых участков) и дополнительные вблизи торца обмотки.

Составляющие индукции, T , можно подсчитать по формулам

$$B_x = 0,2 A\alpha \cdot 10^{-4}, \quad (7-56)$$

$$B_y = 0,2 A\beta \cdot 10^{-4}, \quad (7-56')$$

где $A = I\omega \sqrt{2}/2h$ — линейная плотность м. д. с. данной обмотки, амплитудное значение;

α и β — коэффициенты, определяемые по соотношению координат точки A и размеров обмотки:

$$\alpha = \frac{1}{2} \ln \frac{\varepsilon^2 + (\eta - 1)^2}{\varepsilon^2 + (\eta + 1)^2}; \quad (7-57)$$

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{\eta + 1}{\varepsilon} - \operatorname{arctg} \frac{\eta - 1}{\varepsilon}; \quad (7-58)$$

$$\varepsilon = x/h; \quad \eta = y/h.$$

При определении B от каждой из обмоток 1, 2, 1' и 2' (рис. 7-15) для осей двух обмоток 1 и 2 будут изменяться x , ε , α и β ; ордината y будет изменяться для разных точек оси каждой из обмоток.

Распределение м. д. с. в обмотках, за исключением многослойных цилиндрических, обычно не бывает равномерным вследствие необходимости отключать регулировочные витки, вводить изоляционные промежутки и т. д. При неравномерном распределении м. д. с. для расчета индукции может быть использован описанный метод при замене действительной обмотки несколькими фиктивными. Например, обмотка с тремя различными значениями A (рис. 7-16) может быть заменена тремя обмотками разной высоты с тремя фиктивными значениями A : $A_{1\phi} = A_1$; $A_{2\phi} = A_2 - A_1$ и $A_{3\phi} = A_3 - A_2$ и разными высотами $h_{2\phi} = h - h_1$; $h_{1\phi} = h$ и $h_{3\phi} = h - h_1 - h_3$.

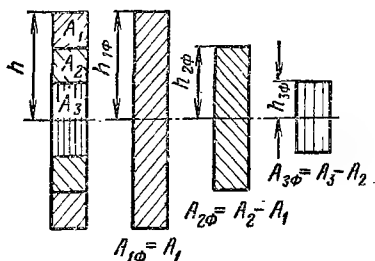
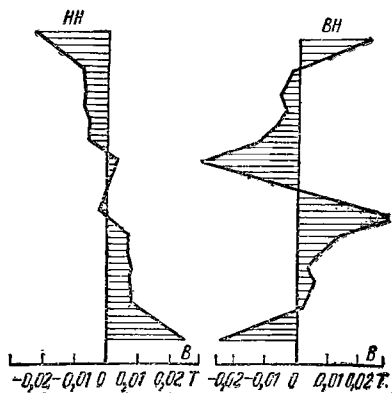


Рис. 7-16. Замена реальной обмотки тремя фиктивными.

Рис. 7-17. Индукция поперечного поля рассеяния для обмоток НН и ВН трансформатора 4000 кВ·А класса 10 кВ.



При расчете поля в этом последнем случае составляющие индукции B_x и B_y рассчитываются для каждой фиктивной обмотки и ее отображения. Все фиктивные обмотки размещаются на той же оси, что и замененная ими обмотка.

Расчет индукции поля рассеяния по описанному методу является чрезвычайно трудоемкой работой. Значительное ускорение и облегчение работы могут дать таблицы рассчитанных значений α и β для различных ε и η . При отсутствии таких таблиц и при более сложных задачах рекомендуется вести расчет на вычислительных машинах.

На рис. 7-17 показано распределение индукции поля рассеяния по осям обмоток НН и ВН для трансформатора ТМ-4000/10 класса напряжения 10 кВ, рассчитанное и построенное по описанному методу.

7-5. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Трансформатор ТМ-1600/35. Вариант I_M (медные обмотки)

Потери короткого замыкания (по § 7-1). Основные потери — по формуле (7-3).

Обмотка НН

$$P_{\text{осн1}} = 2,4 \Delta_1^2 G_{M1} = 2,4 \cdot 3,59^2 \cdot 223,8 = 6920 \text{ Вт};$$

обмотка ВН

$$P_{\text{осн2}} = 2,4 \cdot 3,62^2 \cdot 315,6 = 9900 \text{ Вт}.$$

Добавочные потери в обмотке НН по (7-14')

$$k_{\text{д1}} = 1 + 0,095 \beta^2 a^4 n^2 = 1 + 0,095 \cdot 0,262 \cdot 0,45^4 \cdot 6^2 = 1,037;$$

$$\beta^2 = \left(\frac{bm}{l} k_p \right)^2 = \left(\frac{0,71 \cdot 42}{55,5} 0,95 \right)^2 = 0,262$$

(предварительно принимаем $k_p = 0,95$).

Добавочные потери в обмотке ВН

$$k_{\text{д2}} = 1 + 0,095 \cdot 0,3 \cdot 0,15^4 \cdot 19^2 = 1,005;$$

$$\beta^2 = \left(\frac{0,5 \cdot 64}{55,5} 0,95 \right)^2 = 0,30.$$

Основные потери в отводах. Длина отводов определяется приближенно по (7-21). Для схемы соединения звезда отводы ВН и НН имеют одинаковую длину

$$l_{\text{отв}} = 7,5 l = 7,5 \cdot 55,5 = 416 \text{ см}.$$

Масса отводов НН

$$G_{\text{отв1}} = l_{\text{отв1}} \Pi_1 \gamma_M \cdot 10^{-5} = 416 \cdot 373,2 \cdot 8900 \cdot 10^{-8} = 13,8 \text{ кг};$$

Потери в отводах НН

$$P_{\text{отв1}} = 2,4 \cdot 3,59^2 \cdot 13,8 = 426 \text{ Вт.}$$

Масса отводов ВН

$$G_{\text{отв2}} = 416 \cdot 7,29 \cdot 8900 \cdot 10^{-8} = 0,270 \text{ кг;}$$

потери в отводах ВН

$$P_{\text{отв2}} = 2,4 \cdot 3,62^2 \cdot 0,270 = 9 \text{ Вт.}$$

Потери в стенках бака и других элементах конструкции до выяснения размеров бака можно определить приближенно по (7-25) и табл. 7-1:

$$P_6 = 10kS = 10 \cdot 0,025 \cdot 1600 = 400 \text{ Вт.}$$

Полные потери короткого замыкания

$$\begin{aligned} P_K &= P_{\text{осн1}} k_{\text{д1}} + P_{\text{осн2}} k_{\text{д2}} + P_{\text{отв1}} + P_{\text{отв2}} + P_6 = \\ &= 6920 \cdot 1,037 + 9900 \cdot 1,005 + 426 + 9 + 400 = 17\,705 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Для номинального напряжения обмотки ВН на средней ступени

$$P_K = 17\,705 - 0,05 \cdot 9950 = 17\,207 \text{ Вт,}$$

$$\text{или } \frac{17\,207}{18\,000} \cdot 100 = 95,5\% \text{ заданного значения.}$$

Расчет напряжения короткого замыкания по § 7-2.

Активная составляющая

$$u_a = \frac{P_K}{10S} = \frac{17\,207}{10 \cdot 1600} = 1,075\%.$$

Реактивная составляющая

$$\begin{aligned} u_p &= \frac{7,92 \beta S' \beta a_p k_p k_q}{u_B^2} 10^{-3} = \\ &= \frac{7,92 \cdot 50 \cdot 533,3 \cdot 2,25 \cdot 4,93 \cdot 0,946 \cdot 1,028}{19^2} = 6,3\% \end{aligned}$$

$$\beta = \frac{\pi d_{12}}{l} = \frac{\pi \cdot 39,7}{55 \cdot 5} = 2,25;$$

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} = 2,7 + \frac{3,0 + 3,7}{3} = 4,93;$$

$$k_p = 1 - \sigma (1 - e^{-1/\sigma}) = 1 - 0,054 (1 - e^{-1/0,054}) = 0,946;$$

$$\sigma = \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi l} = \frac{2,7 + 3,0 + 3,7}{55,5} = 0,054;$$

$$k_q = 1 + \frac{l x^2}{m a_p k_p} = 1 + \frac{55,5 \cdot 0,084^2}{3 \cdot 4,93 \cdot 0,95} = 1,028;$$

$$x = \frac{l_x}{l} 100 = \frac{4,65}{55,5} = 0,084 \text{ (рис. 7-18)}$$

$$u_k = \sqrt{u_p^2 + u_a^2} = \sqrt{6,3^2 + 1,075^2} = 6,4\%,$$

$$\text{или } \frac{6,4}{6,5} 100 = 98,5\% \text{ заданного значения.}$$

Установившийся ток короткого замыкания на стороне ВН

$$I_{к-у} = I_{\Phi 2} \frac{100}{u_k} = 26,4 \frac{100}{6,4} = 413 \text{ А.}$$

Мгновенное максимальное значение тока короткого замыкания

$$i_{к.м} = 1,41 k_m I_{к-у} = 1,41 \cdot 1,575 \cdot 413 = 915 \text{ А,}$$

$$\text{где } k_m = 1 + e^{-\pi u_a / u_p} = 1 + e^{-\pi \cdot 1,08 / 6,3} = 1,575.$$

Радиальная сила

$$F_p = 0,628 (i_{к.м} w)^2 \beta k_p \cdot 10^{-6} = 0,628 (915 \cdot 1064)^2 \times$$

$$\times 2,25 \cdot 0,946 \cdot 10^{-6} = 1\,267\,000 \text{ Н.}$$

Среднее растягивающее напряжение в проводах обмотки ВН

$$\sigma_p = \frac{F_p}{2\pi w_{н2} \Pi_2} = \frac{1\,267\,000}{2\pi \cdot 1064 \cdot 7,29} = 26 \text{ МПа}$$

(43% допустимого $\sigma_{p.д} = 60 \text{ МПа}$).

Осевые силы по рис. 7-11, в:

$$F'_{oc} = F_p \frac{a_p}{2l} = 1\,267\,000 \frac{4,93}{2 \cdot 55,5} = 56\,200 \text{ Н;}$$

$$F''_{oc} = F_p \frac{l_x}{l'' k_p m} = 1\,267\,000 \frac{8,05}{25 \cdot 0,946 \cdot 4} = 107\,600 \text{ Н}$$

($l_x = 8,05$ по рис. 7-18, а; расположение обмоток по рис. 7-11, в); $m = 4$. После установления размеров бака $l'' = 25 \text{ см}$; распределение осевых сил в обмотке по рис. 7-18, б.

Максимальные сжимающие силы в обмотках

$$F_{сж1} = F'_{oc} + F''_{oc} = 56\,200 + 107\,600 = 163\,800 \text{ Н;}$$

$$F_{сж2} = F''_{oc} - F'_{oc} = 107\,600 - 56\,200 = 51\,400 \text{ Н.}$$

Наибольшая сжимающая сила наблюдается в середине высоты обмотки НН (I), где $F_{сж} = 163\,800 \text{ Н}$. Напряжение сжатия на

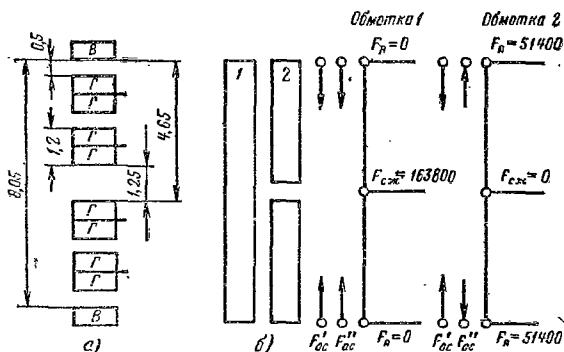


Рис. 7-18. Механические силы в обмотках трансформатора ТМ-1600/35. Вариант I_м.

а — определение зоны разрыва в обмотке ВН при расчете u_p (меньшее значение l_x) и при расчете осевых механических сил (большее значение l_x);
б — распределение осевых механических сил.

междувитковых прокладках

$$\sigma_{сж} = \frac{F_{сж}}{nab} = \frac{163\,800}{12 \cdot 30 \cdot 40} = 11,38 \text{ МПа},$$

что ниже допустимого 18—20 МПа.

Температура обмотки через $t_k = 5$ с после возникновения короткого замыкания по (7-54)

$$\vartheta_k = \frac{670 t_k}{12,5 \left(\frac{u_k}{\Delta} \right)^2 - t_k} + \vartheta_H = \frac{670 \cdot 5}{12,5 \left(\frac{6,3}{3,62} \right)^2 - 5} + 90 = 191,5^\circ \text{C}.$$

Трансформатор ТМ-1600/35. Вариант II_А (алюминиевые обмотки)

Потери короткого замыкания по § 7-1. Основные потери — по формуле (7-4).

Обмотка НН $P_{осн1} = 12,75 \cdot 1,78^2 \cdot 156,2 = 6300$ Вт.

Обмотка ВН $P_{осн2} = 12,75 \cdot 1,62^2 \cdot 261,1 = 8750$ Вт.

Добавочные потери в обмотке НН по (7-15')

$$k_{д1} = 1 + 0,037 \cdot 0,787 \cdot 0,2834 \cdot 8^2 = 1,012;$$

$$\beta_1^2 = \left(\frac{4 \cdot 12,5 \cdot 1,68}{90} 0,95 \right)^2 = 0,787$$

(предварительно принимаем $k_p = 0,95$).

Добавочные потери в обмотке ВН

$$k_{д2} = 1 + 0,037 \cdot 0,75 \cdot 0,3054 \cdot 9^2 = 1,020;$$

$$\beta_2^2 = \left(\frac{149 \cdot 0,55}{90} 0,95 \right)^2 = 0,75.$$

Основные потери в отводах. Длина отводов НН и ВН приближенно по (7-21) $l_{отв} = 7,5 \cdot 90 = 675$ см (схема соединения звезда — звезда).

Обмотка НН

$$G_{отв1} = 675 \cdot 752 \cdot 2700 \cdot 10^{-8} = 13,7 \text{ кг};$$

$$P_{отв1} = 12,75 \cdot 1,78^2 \cdot 13,7 = 552 \text{ Вт.}$$

Обмотка ВН

$$G_{отв2} = 675 \cdot 16,3 \cdot 2700 \cdot 10^{-8} = 0,298 \text{ кг};$$

$$P_{отв2} = 12,75 \cdot 1,62^2 \cdot 0,298 = 10 \text{ Вт.}$$

Потери в стенках бака и других элементах конструкции до выяснения размеров бака приближенно:

$$P_{\delta} = 10 \cdot 0,025 \cdot 1600 = 400 \text{ Вт.}$$

Полные потери короткого замыкания

$$P_K = 6300 \cdot 1,012 + 8750 \cdot 1,02 + 552 + 10 + 400 = 16\,262 \text{ Вт.}$$

Для обмотки ВН на средней ступени (номинальное напряжение)

$$P_K = 16\,262 - 0,05 \cdot 8925 = 15\,816 \text{ Вт,}$$

$$\text{или } \frac{15\,816}{16\,000} 100 = 98,85\% \text{ заданного значения.}$$

Напряжение короткого замыкания. Активная составляющая

$$u_a = \frac{15\,816}{10 \cdot 1600} = 0,989 \approx 0,99\%.$$

Реактивная составляющая

$$u_p = \frac{7,92 \cdot 50 \cdot 533,3 \cdot 1,375 \cdot 5,9 \cdot 0,96}{15,96^2} 10^{-3} = 6,46\%;$$

$$\beta = \frac{\pi \cdot 39,4}{90} = 1,375; \quad a_p = 3,0 + \frac{3,7 + 5,0}{3} = 5,9 \text{ см};$$

$$l_x = 0; \quad k_q = 1,0; \quad k_p = 1 - 0,04 (1 - e^{-1/0,01}) = 0,96;$$

$$\sigma = \frac{3,0 + 3,7 + 5,0}{\pi \cdot 90} = 0,04;$$

$$u_K = \sqrt{6,46^2 + 0,99^2} = 6,53\%,$$

$$\text{или } \frac{6,53}{6,5} 100 = 100,5\% \text{ заданного значения.}$$

Установившийся ток короткого замыкания

$$I_{к.у} = 26,4 \frac{100}{6,53} = 405 \text{ А.}$$

Мгновенное максимальное значение тока короткого замыкания

$$i_{к.м} = 1,41 \cdot 1,60 \cdot 405 = 915 \text{ А;}$$

$$k_m = 1 + e^{-\pi \cdot 0,99/6,46} = 1,60.$$

Радиальная сила

$$F_p = 0,628 (915 \cdot 1266)^2 \cdot 1,375 \cdot 0,96 \cdot 10^{-6} = 1\,112\,600 \text{ Н.}$$

Растягивающее напряжение в проводе обмотки ВН

$$\sigma_p = \frac{1\,112\,600}{2\pi \cdot 1266 \cdot 16,3} = 8,6 \text{ МПа}$$

(35% допустимого $\sigma_{p.д} = 25 \text{ МПа}$).

Полная осевая сила по (7-51)

$$F_{ос} = 7,5 d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2} \right) \cdot (i_{к.м} w)^2 \frac{1}{l^2} K \cdot 10^{-6} =$$
$$= 7,5 \cdot 39,4 \cdot 7,35 (915 \cdot 1064)^2 \frac{1}{90^2} 0,3 \cdot 10^{-6} = 108\,000 \text{ Н.}$$

$$a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2} = 3,0 + \frac{3,7 + 5,0}{2} = 7,35 \text{ см;}$$

$$K = \Delta_1 k_{01} + \Delta_2 k_{02} = 1,67 \cdot 0,18 + 11,0 \cdot 0 = 0,3;$$

$$\Delta_1 = \frac{1,5}{90} 100 = 1,67\%;$$

$$k_{01} = 0,33 - 1,15 a_0 / l = 0,33 - 1,15 \frac{11,7}{90} = 0,18;$$

$$a_0 = 3,0 + 3,7 + 5,0 = 11,7 \text{ см; } k_{02} = 0;$$

$$\Delta_2 = (100/n) = (100/9) = 11\%.$$

Напряжение сжатия на прокладках обмотки ВН

$$\sigma_{сж} = \frac{F_{ос}}{nab} = \frac{108\,000}{12 (50 - 10) \cdot 40} = 5,62 \text{ МПа.}$$

Температура обмотки через $t_k = 5$ с после возникновения короткого замыкания по (7-54)

$$\vartheta_k = \frac{670 \cdot 5}{5,5 \left(\frac{6,53}{1,78} \right)^2 - 5} + 90 = 138,5^\circ \text{C.}$$

РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТРАНСФОРМАТОРА

8-1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Основные размеры и данные стержня магнитной системы — его диаметр и высота, число ступеней и активное сечение — приблизительно определяются в начале расчета трансформатора до расчета обмоток. Окончательный расчет магнитной системы обычно проводится после того, как установлены размеры обмоток трансформатора и главных изоляционных промежутков и проверены некоторые параметры трансформатора — потери и напряжение короткого замыкания. При окончательном расчете определяются: размеры пакетов стержня и ярма, расположение охлаждающих каналов, активные сечения стержня и ярма, число пластин стали в пакетах, высота стержня, расстояние между осями стержней, масса стержней, ярм и полная масса стали в трансформаторе. После окончательного установления всех размеров определяются потери и ток холостого хода.

Раскрой листовой и рулонной стали на пластины для магнитной системы следует вести так, чтобы направление магнитных индукционных линий в стержнях и ярмах совпадало с направлением прокатки стали. Для этого длинная сторона пластин должна всегда располагаться вдоль большей стороны стандартных листов стали или вдоль полосы рулона, а их ширина — по ширине стандартного листа или полосы рулона. Эти рекомендации обязательны как для горячекатаной, так и особенно для холоднокатаной стали, обладающей анизотропией магнитных свойств. Предпочтительно следует применять рулонную сталь, которая по сравнению с листовой позволяет получить существенно меньшие отходы и в большей мере механизировать заготовку пластин для прямого и косого стыка.

Ширина пластин в стержне трансформатора должна выбираться так, чтобы по ширине стандартного листа 750 или 1000 мм с учетом обрезки кромок 15 мм на две стороны или по ширине полосы рулонной стали 750 или 900 мм с обрезкой кромок на 6—14 мм можно было получить раскрой стали с минимальными отходами. В на-

стоящее время принята нормаль, рекомендуемая следующие размеры ширины пластин магнитных систем: 40, 55, 65, 75, 85, 95, 105, 120, 135, 155, 175, 195, 215, 230, 250, 270, 295, 310, 325, 350, 368, 385, 410, 425, 440, 465, 485, 505, 520, 540, 560, 580, 600, 615, 630, 650, 670, 695, 715, 735 мм.

При проектировании серий раскрой листов для трансформатора каждого типа необходимо производить самостоятельно ввиду того, что комбинирование раскроя двух или более типов на одних и тех же листах при неравном

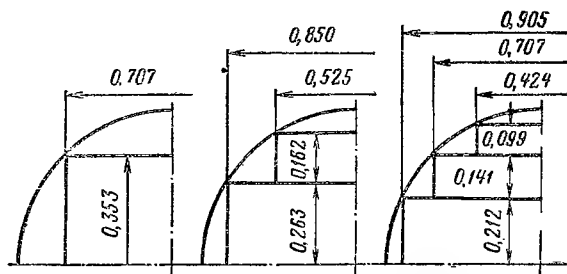


Рис. 8-1. Размеры ступеней стержня, обеспечивающие максимальное заполнение круга площадью ступенчатой фигуры $d=1,000$.

по количеству выпуске трансформаторов этих типов будет приводить к ненужному увеличению складских запасов пластин, заготовленных для менее ходовых типов.

Размеры пакетов стержня следует выбирать с таким расчетом, чтобы площадь поперечного сечения (ступенчатой фигуры) стержня была максимально возможной. Оптимальные размеры ступеней (ширина пакетов a и толщина b в долях от диаметра стержня d), дающие максимальный коэффициент заполнения $k_{кр}$ площади круга площадью ступенчатой фигуры для числа ступеней от 1 до 3, приведены на рис. 8-1.

Число ступеней в сечении стержня, размеры пакетов, размеры и размещение охлаждающих каналов для масляных трансформаторов с плоской магнитной системой определяются специальной нормалью и для диаметров стержней от 80 до 750 мм могут быть выбраны по табл. 8-1а — 8-1в. В этих таблицах число и размеры пакетов приведены для двух вариантов вертикальной стяжки остова — вертикальными шпильками, соединяющими

Размеры пакетов — ширина пластин и толщина пакетов, мм, для магнитных систем с прессовкой стержней обмоткой

Диаметр стержня, мм	Без прессующей пластины		С прессующей пластиной		Ширина крайнего пакета, мм	Толщина пакетов при ширине пластин, мм												
	Число ступеней	Высота сегмента, мм	Число ступеней	Высота сегмента, мм		40	55	65	75	85	95	105	120	135	155	175	195	215
80	4	6	—	—	55	5	6	9	14	—	—	—	—	—	—	—	—	—
90	5	5	—	—	55	5	4	6	10	15	—	—	—	—	—	—	—	—
100	6	4	—	—	55	4	4	5	7	10	16	—	—	—	—	—	—	—
110	6	4	—	—	65	7	—	4	6	7	11	16	18	—	—	—	—	—
125	6	3,5	—	—	65	6	—	7	—	6	6	16	17	—	—	—	—	—
140	6	3	—	—	65	5	—	7	—	9	—	10	17	19	—	—	—	—
160	6	5	—	—	85	—	7	—	—	7	—	7	10	23	20	—	—	—
180	6	6	—	—	95	—	—	8	—	—	9	—	8	13	25	21	—	—
200	7	8	6	15	120	—	—	—	7	—	—	5	6	11	15	26	22	28
220	8	7	7	14	120	—	—	—	7	—	—	4	5	9	12	15	28	23

Примечания: 1. В табл. 8-1а—8-1в представлена толщина пакетов в одной половине сечения стержня, мм.

2. Размеры пакетов в таблицах даны для стержня без прессующей пластины. При наличии прессующей пластины в двух половинах сечения стержня исключается пакет с наименьшей шириной пластины.

3. Стержни с диаметром 20 и 22 см могут прессоваться обмоткой или бандажами; стержни с большим диаметром прессуются бандажами из стеклоленты.

Таблица 8-16
Размеры пакетов — ширина пластин и толщина пакетов, мм, для магнитных систем с прессовкой бандажами

Диаметр стержня, мм	Без прессующей пластины		С прессующей пластиной		Ширина крайнего пакета арм., мм	Толщина пакетов при ширине пластин, мм														395	410		
	Число ступеней	Высота сегмента, мм	Число ступеней	Высота сегмента, мм		95	105	120	135	155	175	195	215	230	250	270	295	310	325			350	368
240	8	10	7	16	135	6	—	5	8	9	12	17	19	34	—	—	—	—	—	—	—	—	—
260	8	11	7	17	155	—	6	9	—	8	10	13	13	25	35	—	—	—	—	—	—	—	—
280	8	11	7	18	175	—	7	—	13	—	9	11	9	17	26	37	—	—	—	—	—	—	—
300	8	10	7	16	175	—	6	—	12	—	18	—	8	13	18	37	28	—	—	—	—	—	—
320	9	15	8	20	195	—	—	—	5	12	—	8	7	11	14	24	22	40	—	—	—	—	—
340	9	14	8	20	195	—	—	—	6	11	—	14	—	10	12	19	15	19	50	—	—	—	—
360	9	13	8	20	195	—	—	—	7	9	—	13	—	9	10	16	26	—	35	42	—	—	—
380	9	13	8	19	215	—	—	—	6	15	—	—	13	—	23	—	10	12	24	27	47	—	—
400	11	16	10	20	215	—	—	—	—	4	6	6	12	—	9	12	19	—	20	18	3*	54—	3*
420	11	15	10	24	250	—	—	—	—	9	—	6	12	—	7	12	16	—	17	15	17	38	46— 3*

* Двойные числа обозначают, что в данном пакете сделан продольный охлаждающий канал. Например, 47—3 обозначает, что при общей толщине пакета с каналом 47 мм сделан канал 3 мм.

Размеры пакетов — ширина пластин и толщина пакетов, мм,

Диаметр стержня, мм	Без прессующей пластины		С прессующей пластиной		Ширина крайнего пакета ярма, мм	Толщина пакетов					
	Число ступеней	Высота сегмента, мм	Число ступеней	Высота сегмента, мм		175	195	215	230	250	270
450	14	18	13	26	250	8	6	—	6	7	10
480	14	17	13	26	270	9	—	9	—	7	9
500	14	16	13	24	270	8	—	9	—	6	9
530	15	19	14	27	295	—	8	—	10	—	8

при ширине

						195	230	250	270	295	325
560	15	18	14	25	295	7	10	—	7	10	10
600	16	17	15	28	325	11	—	11	—	9	9

при ширине

						215	230	270	310	350	385
630	16	16	15	22	350	6	7	10	12	13	10
670	16	18	15	29	385	11	—	9	12	11	9

при ширине

						230	250	270	310	350	385
710	16	19	15	27	425	8	—	9	10	11	14
750	16	22	15	34	465	—	12	—	10	9	13

* Двойные цифры обозначают, что в данном пакете сделан продольный пакета с каналом 31 мм сделан канал 6 мм.

для магнитных систем с прессовкой бандажами

при ширине пластин, мм

295	310	325	350	368	385	410	425	440	465	485	505	520
7	8	14	12	13	23	19	27	47— 3*	—	—	—	—
6	7	12	10	10	18	14	15	37	59— 3*	—	—	—
12	—	12	9	10	16	11	13	27	31— 6*	61	—	—
11	—	10	9	8	14	10	10	21	20	27— 6*	29	51

пластин, мм

350	368	385	410	440	465	485	505	520	540	560	580	—
7	8	12	18	17	16	19	17	30— 6*	74	—	—	—
6	7	11	15	15	13	14	12	20	22	31— 6*	77	—

пластин, мм

410	440	465	485	505	520	540	560	580	600	615	630	650
14	13	11	13	26	—	18	21— 6*	27	28	68— 3*	—	—
13	21	—	20	—	13	14	16	19— 6*	16	19	33	81— 3*

пластин, мм

425	465	505	540	560	580	600	630	650	670	695	715	735
16	19	19	12	13	15	26	21— 6*	25	45	73— 3*	—	—
15	17	17	22	—	13	22	16	19	27— 6*	28	38	75— 3*

охлаждающий канал. Например, 31—6 обозначает, что при общей толщине

верхние и нижние ярмовые балки и расположенными снаружи обмоток (без прессующей пластины), и стальными пластинами, положенными на меньший по ширине пакет стержня, соединяющими верхние и нижние ярмовые балки и расположенными внутри внутренней обмотки (с прессующей пластиной). Во втором варианте прессующая пластина занимает место наиболее узкого пакета стержня, число пакетов уменьшается на единицу,

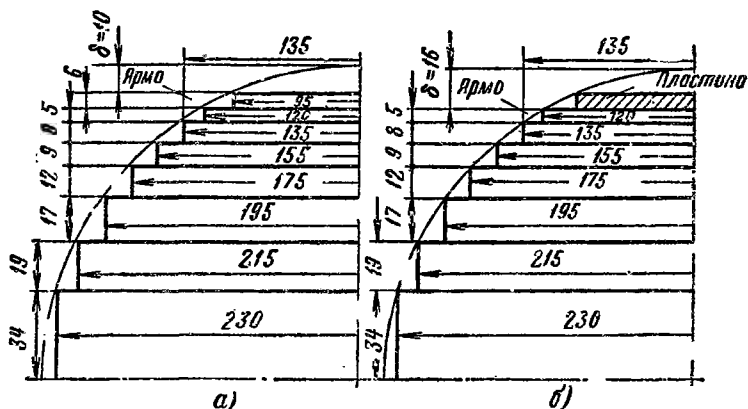


Рис. 8-2. Сечения стержня и ярма по табл. 8-1 для стержня с диаметром 240 мм.

а — стержень без прессующей пластины; б — стержень с прессующей пластиной.

полное сечение стержня — площадь ступенчатой фигуры и коэффициент заполнения круга $k_{кр}$ уменьшаются по сравнению с первым вариантом.

Форма поперечного сечения ярма в средней своей части по размерам пакетов повторяет сечение стержня. Крайние пакеты в целях улучшения прессовки ярма ярмовыми балками, более равномерного распределения давления по ширине пакетов и уменьшения веера пластин на углах пакетов делаются более широкими путем объединения двух-трех пакетов в один. Так, для изображенных на рис. 8-2 двух вариантов сечения стержня с диаметром 240 мм крайний пакет ярма в первом варианте имеет размеры $(6+5+8) \times 135$ мм, а во втором варианте — $(5+8) \times 135$ мм.

Площади поперечного сечения стержня $P_{ф.с}$ и ярма $P_{ф.я}$ для размеров пакетов по табл. 8-1 и диаметров

Площади сечения стержня $P_{\phi,с}$ и ярма $P_{\phi,я}$
при наличии прессующей полосы и без нее
для нормализованных размеров пакетов по табл. 8-1

Диаметр стержня, см	Без прессующей пластины		С прессующей пластиной		Диаметр стержня, см	Без прессующей пластины		С прессующей пластиной	
	Сечение стержня, см ²	Сечение ярма, см ²	Сечение стержня, см ²	Сечение ярма, см ²		Сечение стержня, см ²	Сечение ярма, см ²	Сечение стержня, см ²	Сечение ярма, см ²
8	43,3	44,8	—	—	34	844,8	860,8	828,6	837,4
9	56,7	58,2	—	—	36	929,2	944,8	910,3	917,5
10	72,0	73,2	—	—	38	1035,8	1063,4	1019,6	1037,6
11	86,2	89,7	—	—	40	1155,6	1167,6	1143,2	1150,4
12,5	112,3	115,3	—	—	42	1282,9	1315,0	1255,0	1270,0
14	141,5	144,0	—	—	45	1479,2	1500,2	1451,2	1393,1
16	183,5	188,3	—	—	48	1688,9	1718,7	1657,4	1670,1
18	232,8	237,6	—	—	50	1816,4	1843,9	1788,4	1800,7
20	288,4	296,2	277,9	279,4	53	2044,8	2077,8	2013,6	2030,8
22	353,0	360,5	342,5	343,7	56	2286,2	2316,7	2258,9	2275,4
24	419,3	425,6	407,9	409,4	60	2639,4	2690,9	2596,5	2618,4
26	490,6	507,1	478,0	488,5	63	2892,5	2958,3	2697,0	2916,3
28	570,9	591,1	556,2	566,6	67	3273,9	3357,7	3226,6	3273,0
30	657,2	675,2	644,6	654,2	71	3688,0	3797,8	3651,2	3729,8
32	746,2	762,4	732,7	743,9	75	4115,7	4251,8	4055,7	4140,2

стержней от 80 до 750 мм при отсутствии и наличии прессующей пластины приведены в табл. 8-2.

В сухих трансформаторах с плоской магнитной системой размеры пакетов могут быть выбраны по табл. 8-1, однако при диаметрах стержней от 240 до 320 мм следует предусмотреть в стержнях и ярмах продольные каналы с числом и размерами по табл. 2-4б, с соответствующим уменьшением сечений стержня и ярма по отношению к данным табл. 8-2.

Для пространственных магнитных систем по рис. 2-7,а число и размеры пакетов стержня также могут быть выбраны по табл. 8-1 с учетом площади центрального осевого отверстия в стержне. Ярмо в магнитных

системах этого типа обычно имеет прямоугольную форму сечения.

Для пространственных магнитных систем по рис. 2-7, б число и размеры пакетов стержня могут быть выбраны по табл. 8-1 (без прессующей пластины). Сечение ярма повторяет сечение стержня.

Полное сечение ступенчатой фигуры стержня, см²,

$$P_{\phi.c} = \Sigma a_n b_n. \quad (8-1)$$

Активное сечение стержня

$$P_c = k_3 P_{\phi.c}. \quad (8-2)$$

Для стержня с охлаждающими каналами из размеров пакетов b_n и a_n исключаются соответствующие размеры продольных и поперечных каналов.

Для того случая, когда число и размеры пакетов в стержне выбраны по табл. 8-1, сечение $P_{\phi.c}$ определяется по табл. 8-2. Для пространственной магнитной системы по рис. 2-7, а из площади, найденной по табл. 8-2, исключается площадь центрального осевого отверстия в стержне для размещения вертикальной стяжной шпильки остова, равная 4 см² для диаметров стержня 11—14 см, 6,25 см² для диаметров 16—22 см и 9—25 см² для диаметров 24—38 см.

Полное сечение ярма плоской магнитной системы можно определять подобно сечению стержня путем суммирования сечений пакетов с исключением площади сечения охлаждающих каналов. При выборе числа и размеров пакетов ярма по табл. 8-1 полное сечение ярма определяется по табл. 8-2. Ширина ярма b_y (рис. 8-1 и 8-2) определяется суммой толщин пакетов стержня.

Для ярма, имеющего прямоугольную форму поперечного сечения, общая площадь

$$P_{\phi.y} = P_{\phi.c} k_y,$$

где $k_y = 1,15 \div 1,05$ для трансформаторов мощностью от 25 до 6300 кВ·А.

Высота ярма $h_y = \frac{P_{\phi.y}}{b_y}$ при отсутствии охлаждающих каналов в сечении ярма и $h_y = \frac{P_{\phi.y}}{b_y - n_k b_k}$ для ярма с n_k

каналами шириной b_k каждый. Полученная таким образом высота округляется до ближайшей большей ширины пластин нормализованного ряда.

Навитое ярмо пространственной магнитной системы по рис. 2-7, а рассчитывается для магнитного потока, равного $\Phi_{\text{я}} = \Phi_{\text{с}} / \sqrt{3}$ (см. § 2-1). Поэтому сечение ярма такой системы

$$P_{\text{ф.я}} = P_{\text{ф.с}} / \sqrt{3}. \quad (8-3)$$

Ширина навитого ярма, см, в соответствии с рис. 8-3 определяется по формуле

$$b_{\text{я}} = d - 2r - \delta, \quad (8-4)$$

где $2r = 2$ см для диаметров стержня 11—14 см; 2,5 см для диаметров 16—22 см и 3—5 см для диаметров 24—38 см; высота сегмента δ может быть найдена по табл. 8-1.

Высота навитого ярма прямоугольного сечения предварительно:

$$h_{\text{я}} = P_{\text{ф.с}} / \sqrt{3} b_{\text{я}}. \quad (8-5)$$

После определения по формуле (8-5) высота ярма принимается равной ближайшей большей ширине пластин нормализованного ряда и активное сечение ярма

$$P_{\text{я}} = h_{\text{я}} b_{\text{я}} k_3. \quad (8-6)$$

Для пространственной магнитной системы по рис. 2-7, б сечение ярма принимается равным сечению стержня

$$P_{\text{ф.я}} = P_{\text{ф.с}}.$$

Активное сечение ярма

$$P_{\text{я}} = k_3 P_{\text{ф.я}}. \quad (8-7)$$

Число пластин стали в отдельных пакетах стержня и ярма с толщиной пакета $b_{\text{п}}$, см,

$$n_{\text{пл}} = \frac{b_{\text{п}} k_3}{\delta_{\text{ст}}}, \quad (8-8)$$

где $\delta_{\text{ст}}$ — толщина листов стали, см;

k_3 — коэффициент заполнения пакета сталью (по табл. 2-6).

Основные размеры и масса активной стали плоской магнитной системы определяются в следующем порядке:

Определение длины стержня l_c , см, производится по формуле

$$l_c = l + l'_0 + l''_0, \quad (8-9)$$

где l'_0 и l''_0 — расстояния от обмотки до верхнего и нижнего ярма, определяемые по табл. 4-5 или по рис. 4-7.

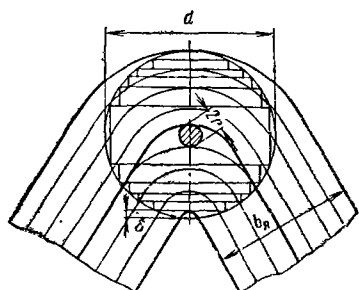


Рис. 8-3. К определению ширины навитого ярма пространственной магнитной системы по (8-4).

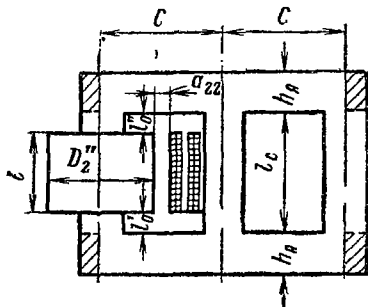


Рис. 8-4. К определению размеров плоской магнитной системы.

При отсутствии нажимных колец, прессующих обмотки (рис. 8-4), l'_0 и l''_0 выбираются только из условий изоляции обмотки. В случае необходимости установки нажимных колец (§ 7-3) расстояние l'_0 до верхнего ярма увеличивается: для трансформаторов мощностью 1000—6300 кВ·А на 4,5 см; для двухобмоточных трансформаторов мощностью 10 000—63 000 кВ·А на 6,0 см и для трехобмоточных трансформаторов этих мощностей на 10,0 см.

Расстояние между осями соседних стержней, см,

$$C = D_2'' + a_{22}, \quad (8-10)$$

где D_2'' — внешний диаметр обмотки ВН;

a_{22} — расстояние между обмотками ВН соседних стержней, определяемое по табл. 4-5 или по

рис. 4-7.

Значение C округляется до 0,5 см.

* Масса стали в стержнях и ярах магнитной системы может определяться различными способами в зависимости от ее конструкции и принятой формы поперечного сечения яра. При этом удобно ввести понятие массы угла магнитной системы. Углом магнитной системы называется ее часть, ограниченная объемом, образованным пересечением боковых призматических или цилиндрических поверхностей одного из ярм и одного из стержней.

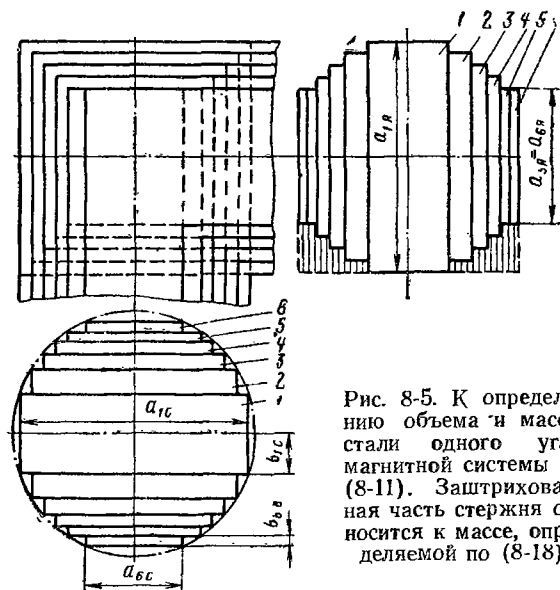


Рис. 8-5. К определению объема и массы стали одного угла магнитной системы по (8-11). Заштрихованная часть стержня относится к массе, определяемой по (8-18).

Для наиболее распространенной многоступенчатой формы поперечного сечения яра в плоской магнитной системе (рис. 8-5) масса стали одного угла, кг, при n ступенях в сечении стержня равна:

$$G_y = 2k_3 \gamma_{ст} \cdot 10^{-6} (a_{1с} a_{1я} b_{1с} + a_{2с} a_{2я} b_{2с} + \dots + a_{nс} a_{nя} b_{nс}), \quad (8-11)$$

где $a_{1с}$, $a_{1я}$ и т. д. — ширина стыкуемых пакетов стержня и яра, см;

$b_{1с}$, $b_{2с}$ и т. д. — толщина пакетов стержня, см, согласно рис. 8-5 в половине сечения стержня;

$\gamma_{\text{ст}}$ — плотность трансформаторной стали, кг/м^3 (применяемые в силовых трансформаторах марки стали имеют плотность: горячекатаная 7550 кг/м^3 ; холоднокатаная 7650 кг/м^3).

При прямоугольной форме сечения ярма

$$G_y = P_c h_y \gamma_{\text{ст}} \cdot 10^{-6}, \quad (8-12)$$

где P_c — в см^2 ; h_y — в см .

Масса стали ярм в этих двух случаях может быть определена как сумма двух слагаемых: массы частей ярм, заключенных между осями крайних стержней, кг,

$$G'_y = 2(c-1)C\Pi_y \gamma_{\text{ст}} \cdot 10^{-6}, \quad (8-13)$$

где c — число активных (несущих обмотки) стержней: для трехфазного трансформатора $c=3$; для однофазного $c=2$; Π_y выражено в см^2 ;

массы стали в частях ярм, заштрихованных на рис. 8-4, кг,

$$G''_y = 4 \frac{G_y}{2} = 2G_y, \quad (8-14)$$

где G'_y определяется по (8-11) или (8-12).

Полная масса двух ярм

$$G_y = G'_y + G''_y. \quad (8-15)$$

Масса стали стержней при многоступенчатой форме сечения ярма определяется как сумма двух слагаемых:

$$G_c = G'_c + G''_c, \quad (8-16)$$

где масса стали стержней в пределах окна магнитной системы

$$G'_c = cP_c l_c \gamma_{\text{ст}} \cdot 10^{-6}; \quad (8-17)$$

P_c выражено в см^2 ; l_c — в см .

Масса стали в местах стыка пакетов стержня и ярма (места, заштрихованные на рис. 8-5):

$$G''_c = c(P_c a_{1y} \gamma_{\text{ст}} \cdot 10^{-6} - G_y). \quad (8-18)$$

Для магнитной системы с прямоугольной формой поперечного сечения ярма масса стали стержней определяется по (8-16) при $G''_c = 0$.

Полная масса стали плоской магнитной системы, кг,

$$G_{\text{ст}} = G_{\text{с}} + G_{\text{я}}. \quad (8-19)$$

Для определения массы стали в стержнях пространственной магнитной системы по рис. 2-7, а можно воспользоваться (8-16), принимая $G_{\text{с}}'' = 0$. Массу стали в ярмах этой системы, полагая форму поперечного сече-

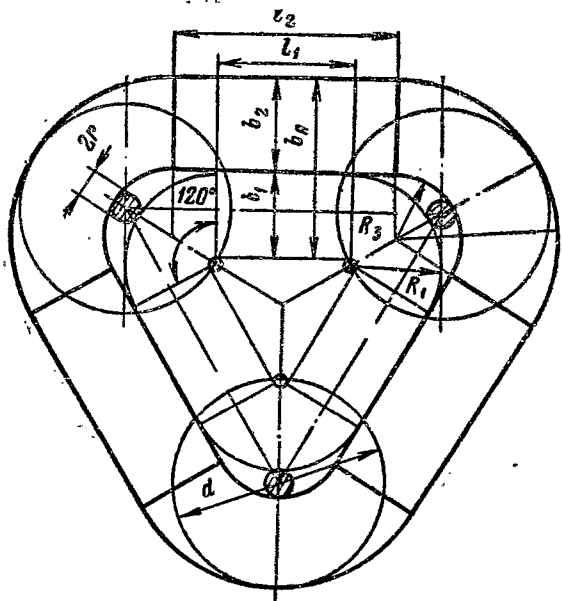


Рис. 8-6. К определению массы стали ярм пространственной магнитной системы по рис. 2-7, а.

ния ярма прямоугольной и пользуясь рис. 8-6, можно рассчитать по

$$G_{\text{я}} = 2k_3 \Pi'_{\text{я}} h_{\text{я}} \gamma_{\text{ст}} \cdot 10^{-6}, \quad (8-20)$$

где $\Pi'_{\text{я}}$ — площадь ярма в плане, см²:

$$\Pi'_{\text{я}} = 3b_1 l_1 + 3b_2 l_2 + \pi R_1^2 + \pi R_2^2 - \pi R_3^2; \quad (8-21)$$

$$b_1 = \frac{d}{2} - r - \delta \quad (\delta \text{ по рис. 8-3 и по табл. 8-1});$$

$$b_2 = \frac{d}{2} - r; \quad l_1 = C - d \cos 30^\circ;$$

$$l_2 = C - (d - 8r) \cos 30^\circ; \quad R_1 = \frac{d}{2} - r;$$

$$R_2 = d - 4r; \quad R_3 = \frac{d}{2} - 3r.$$

Объем стали угла пространственной магнитной системы по рис. 2-7, а может быть найден как произведение активного сечения стержня без площади серповидного отверстия в ярме на высоту ярма $h_{\text{я}}$, определяемую по (8-5). Площадь серповидного отверстия с достаточной точностью определяется как десятикратная площадь круга с диаметром $2r$.

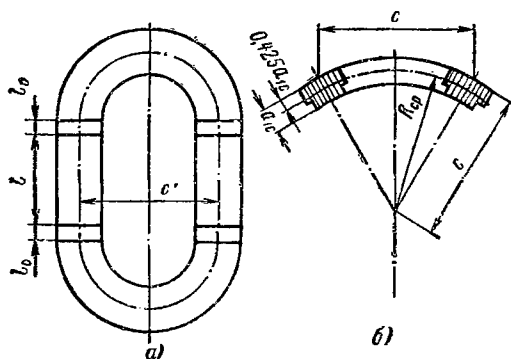


Рис. 8-7. Навитое стальное кольцо пространственной магнитной системы.

а — до деформации;
б — после деформации.

Масса стали угла

$$\begin{aligned} G_y &= (\Pi_c + 4r^2k_3 - 10\pi r^2k_3) h_{\text{я}} \gamma_{\text{ст}} \cdot 10^{-5} = \\ &= (\Pi_c - 27,4r^2k_3) h_{\text{я}} \gamma_{\text{ст}} \cdot 10^{-6}. \end{aligned} \quad (8-22)$$

В пространственной магнитной системе по рис. 2-7, б углы в ярмах не выделяются.

При определении массы стали пространственной магнитной системы по рис. 2-7, б необходимо рассчитать длину средней линии навитого стального кольца. Согласно рис. 8-7, а длина средней линии кольца

$$l_{\text{ср}} = 2(l + 2l_0) + \pi c', \quad (8-23)$$

где l — высота обмотки, см;

l_0 — длина прямого участка за пределами обмотки, см. Поскольку ярмо имеет полукольцевую форму, рас-

стояние l_0 обычно меньше изоляционного расстояния, определяемого по табл. 4-4 или 4-5, в ряде случаев может быть $l_0=0$);

C' — расстояние между осями стержней заготовки кольца до деформации по рис. 8-7, а, см.

$$C' = \pi R_{\text{ср}}/3; \quad (8-24)$$

$R_{\text{ср}}$ определяется по расположению центра тяжести ступенчатого полусечения стержня (рис. 8-7, б), т. е.

$$R_{\text{ср}} = C - 0,425 a_{1c}.$$

Масса стали магнитной системы

$$G_{\text{ст}} = 3\gamma_{\text{ст}} \cdot 10^{-6} l_{\text{ср}} \frac{\Pi_{\text{с}}}{2} = 1,5\gamma_{\text{ст}} l_{\text{ср}} \Pi_{\text{с}} \cdot 10^{-6}. \quad (8-25)$$

8-2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРА

Режим работы трансформатора при питании одной из его обмоток от источника с переменным напряжением при разомкнутых других обмотках называется режимом холостого хода. Потери, возникающие в трансформаторе в режиме холостого хода при номинальном синусоидальном напряжении на первичной обмотке и номинальной частоте, называются потерями холостого хода.

Потери холостого хода трансформатора P_x состоят из магнитных потерь, т. е. потерь в активном материале (стали) магнитной системы, потерь в стальных элементах конструкции остова трансформатора, вызванных частичным ответвлением главного магнитного потока; основных потерь в первичной обмотке, вызванных током холостого хода и диэлектрических потерь в изоляции.

Диэлектрические потери в изоляции могут играть заметную роль только в трансформаторах, работающих при повышенной частоте, а в силовых трансформаторах, рассчитанных на частоту 50 Гц, даже при классах напряжения 500 и 750 кВ обычно малы и могут не учитываться. Также не учитываются в силовых трансформаторах основные потери в первичной обмотке, составляющие обычно менее 1% потерь холостого хода. Потери в элементах конструкции трансформатора при холостом хо-

де относительно невелики и учитываются вместе с другими добавочными потерями.

Магнитные потери — потери в активной стали магнитной системы — составляют основную часть потерь холостого хода и могут быть разделены на потери от гистерезиса и от вихревых токов. Для современной трансформаторной высоколегированной стали горячей прокатки первые из них составляют до 70—80% и вторые до 30—20% полных потерь в стали при толщине листов соответственно 0,5 и 0,35 мм. В холоднокатаной повышенолегированной стали при той же толщине листов потери от гистерезиса составляют до 25—35% и от вихревых токов до 75—65% полных потерь в стали.

В практике расчета при частоте 50 Гц обычно определяют магнитные потери, не разделяя их, и пользуются экспериментально установленной зависимостью между индукцией и удельными потерями в стали. Поскольку при заданной частоте и равномерном распределении индукции потери в единице массы стали однозначно определяются индукцией, эту зависимость выражают в форме потерь в единице массы стали p (Вт/кг) при заданной индукции. Данные экспериментального исследования стали сводятся в таблицы или изображаются кривой удельных потерь $p=f(B)$. Удельные, а также общие потери в стали изменяются с изменением индукции B и частоты f . При необходимости проведения приближенных пересчетов потерь с изменением частоты или индукции можно пользоваться приближенной формулой

$$p \approx B^m f^n, \quad (8-26)$$

где для горячекатаной стали $m=2$; $n=1,30$ при $B=1,0 \div 1,5$ Т. Для холоднокатаной стали $n=1,25$; $m=2$ при $B=1,0 \div 1,5$ Т и $m=3$ при $B=1,5 \div 1,8$ Т.

Следует помнить, что качество электротехнической стали различного происхождения может быть различным. Поэтому при расчете всегда следует пользоваться таблицами или кривыми, относящимися к фактически применяемой стали.

Потери холостого хода трансформатора, плоская шихтованная магнитная система которого собрана из пластин горячекатаной стали (потери в стали), определяются общей массой стали отдельных участков магнитной системы, магнитной индукцией на каждом из

этих участков, качеством стали и толщиной ее листов. Неравномерное распределение индукции по сечению стержня и ярма; изменение структуры стали при механической обработке — резании, штамповании, шлифовании и других механических воздействиях — изгибах пластин и ударах по ним при сборке, воздействии давлением при прессовке магнитной системы; наличие потерь в элементах конструкции — стяжных шпильках, прессующих балках и других, а также в междулистовой лаковой изоляции; местное увеличение индукции на стыках магнитных систем, собираемых впереплет, — все это вызывает добавочные потери, точный учет которых возможен далеко не всегда. При определении потерь холостого хода магнитную систему трансформатора обычно разделяют на две части — стержни и ярма, считая, что каждая из них имеет свою вполне определенную среднюю индукцию. Добавочные потери оцениваются приближенно путем введения постоянного коэффициента к общей сумме потерь в стержнях и ярмах.

Таким образом, потери холостого хода, W_t , для горячекатаной стали

$$P_x = k_d (p_c G_c + p_y G_y), \quad (8-27)$$

где p_c и p_y — удельные потери в 1 кг стали стержня и ярма, зависящие от индукций B_c и B_y , марки и толщины листов стали;

k_d — коэффициент добавочных потерь, который может быть принят:

Диаметр стержня d , см	До 20	20—30	30—50	Более 50
Ярмо прямоугольного сечения k_d	1,0—1,01	1,02—1,05	1,05—1,10	1,10—1,15
Ярмо ступенчатого сечения k_d	1,0	1,0—1,02	1,03—1,05	1,05—1,07

Индукции в стержне B_c и ярме B_y определяются для окончательно установленных значений P_c и P_y , рассчитанных по размерам пакетов по (8-2) и (8-7).

Окончательные значения B_c и B_y , Т, будут:

$$B_c = \frac{u_B \cdot 10^4}{4,44 f P_c}; \quad (8-28)$$

$$B_y = \frac{u_B \cdot 10^4}{4,44 f P_y}. \quad (8-29)$$

Таблица 8-3

Удельные потери p , Вт/кг, в горячекатаной стали марок Э41, Э42 и Э43 по ГОСТ 802-58 с толщиной листов 0,35 мм при различных индукциях и $f=50$ Гц

B, T	Э41-0,35	Э42-0,35	Э43-0,35	B, T	Э41-0,35	Э42-0,35	Э43-0,35
0,600	0,580	0,515	0,450	1,060	1,52	1,36	1,19
0,620	0,594	0,528	0,460	1,080	1,57	1,41	1,24
0,640	0,612	0,540	0,472	1,100	1,63	1,46	1,29
0,660	0,630	0,560	0,486	1,120	1,69	1,52	1,34
0,680	0,656	0,581	0,504	1,140	1,75	1,58	1,39
0,700	0,682	0,605	0,524	1,160	1,81	1,64	1,45
0,720	0,710	0,632	0,537	1,180	1,88	1,70	1,50
0,740	0,742	0,660	0,570	1,200	1,94	1,76	1,56
0,760	0,776	0,690	0,596	1,220	2,01	1,83	1,61
0,780	0,824	0,724	0,625	1,240	2,08	1,89	1,67
0,800	0,850	0,760	0,656	1,260	2,15	1,95	1,73
0,820	0,893	0,795	0,688	1,280	2,21	2,02	1,79
0,840	0,935	0,836	0,722	1,300	2,29	2,09	1,85
0,860	0,980	0,875	0,760	1,320	2,36	2,16	1,91
0,880	1,03	0,920	0,796	1,340	2,43	2,23	1,98
0,900	1,08	0,962	0,836	1,360	2,50	2,30	2,04
0,920	1,13	1,04	0,875	1,380	2,57	2,37	2,10
0,940	1,19	1,06	0,920	1,400	2,64	2,45	2,17
0,960	1,24	1,11	0,960	1,420	2,72	2,52	2,23
0,980	1,29	1,16	1,01	1,440	2,79	2,59	2,30
1,000	1,35	1,20	1,05	1,460	2,86	2,66	2,37
1,020	1,40	1,26	1,10	1,480	2,93	2,73	2,43
1,040	1,46	1,31	1,14	1,500	3,00	2,80	2,50

Примечание. Для приближенного определения удельных потерь в стали тех же марок, но с толщиной листов 0,5, табличные данные для соответствующей марки 0,35 мм следует умножать на коэффициент $k \approx 1,16$.

Значения p для горячекатаной стали различных марок при различных индукциях могут быть взяты из табл. 8-3. Таблица составлена для сталей, отвечающих требованиям ГОСТ 802-58.

При расчете потерь в стали холодной прокатки плоской шихтованной магнитной системы следует учитывать, что удельные потери p в 1 кг стали, приведенные для различных индукций в табл. 8-4, справедливы лишь для случая, когда направление вектора индукции магнитного потока совпадает с направлением прокатки стали. При отклонении магнитного потока от направления прокатки следует считаться с увеличением удельных потерь,

Удельные потери p , Вт/кг, в холоднокатаной стали марок Э310, Э320, Э330 и Э330А по ГОСТ 802-58 с толщиной листов 0,35 мм при различных индукциях и $f=50$ Гц

В, Т	Э310	Э320	Э330	Э330А	p , Вт/см ²	
					Э320, Э330	Э330А
0,900	0,662	0,582	0,503	0,404	—	—
0,920	0,690	0,606	0,522	0,422	—	—
0,940	0,717	0,629	0,542	0,440	—	—
0,960	0,745	0,653	0,561	0,460	—	—
0,980	0,772	0,676	0,581	0,480	—	—
1,000	0,80	0,70	0,60	0,50	0,008	0,019
1,020	0,830	0,725	0,622	0,520	0,008	0,020
1,040	0,860	0,750	0,644	0,536	0,009	0,021
1,060	0,890	0,775	0,666	0,558	0,010	0,022
1,080	0,920	0,800	0,688	0,575	0,011	0,023
1,100	0,950	0,825	0,710	0,596	0,012	0,024
1,120	0,984	0,854	0,734	0,618	0,013	0,026
1,140	1,02	0,883	0,758	0,640	0,014	0,027
1,160	1,05	0,912	0,782	0,660	0,015	0,029
1,180	1,09	0,941	0,806	0,680	0,016	0,030
1,200	1,12	0,970	0,830	0,703	0,0175	0,032
1,220	1,16	1,00	0,858	0,725	0,019	0,034
1,240	1,20	1,03	0,886	0,750	0,021	0,036
1,260	1,23	1,06	0,914	0,770	0,022	0,039
1,280	1,27	1,09	0,942	0,895	0,024	0,041
1,300	1,31	1,13	0,970	0,820	0,025	0,043
1,320	1,35	1,16	1,00	0,842	0,027	0,046
1,340	1,39	1,19	1,03	0,868	0,029	0,049
1,360	1,44	1,22	1,07	0,894	0,031	0,051
1,380	1,48	1,26	1,10	0,920	0,033	0,054
1,400	1,52	1,29	1,13	0,945	0,035	0,057
1,420	1,57	1,33	1,16	0,975	0,038	0,060
1,440	1,61	1,37	1,20	1,00	0,041	0,063
1,460	1,66	1,42	1,23	1,03	0,044	0,067
1,480	1,70	1,46	1,27	1,07	0,047	0,071
1,500	1,75	1,50	1,30	1,10	0,05	0,075
1,520	1,81	1,56	1,35	1,14	0,053	0,078
1,540	1,88	1,62	1,40	1,18	0,056	0,081
1,560	1,94	1,67	1,45	1,22	0,059	0,084
1,580	2,01	1,73	1,50	1,27	0,062	0,087
1,600	2,07	1,79	1,55	1,32	0,065	0,090
1,620	2,16	1,87	1,62	1,38	0,068	0,093
1,640	2,24	1,95	1,69	1,43	0,071	0,095
1,660	2,33	2,04	1,76	1,49	0,074	0,098
1,680	2,41	2,12	1,83	1,54	0,077	0,100

В, Т	Э310	Э320	Э330	Э330А	ρ_3 , Вт/см ²	
					Э320, Э330	Э330А
1,700	2,50	2,20	1,90	1,60	0,08	0,102
1,720	2,60	2,30	2,00	1,67	0,081	0,103
1,740	2,70	2,41	2,09	1,75	0,082	0,104
1,760	2,80	2,51	2,19	1,83	0,083	0,105
1,780	2,90	2,62	2,28	1,91	0,084	0,106
1,800	3,00	2,72	2,38	2,00	0,085	0,107
1,900	3,95	3,58	3,15	2,64	0,086	0,109

Примечания: 1. Для определения удельных потерь в стали тех же марок, но с толщиной листов 0,5 мм, табличные данные для соответствующей марки 0,35 мм следует умножить на коэффициент, равный: а) $k=1,37$ для марок Э310 и Э320 в области индукций 0,900—1,200 Т; $k=1,40$ для 1,200—1,600 Т; $k=1,28$ для 1,600—1,800 Т; для марки Э330 $k=1,34$.

2. В двух последних графах даны добавочные потери ρ_3 в зоне зазора (шихтованного стыка).

3. При отсутствии других более точных данных этой таблицей можно пользоваться для определения удельных потерь для импортной стали М6Х по графе для стали Э330А.

зависящим от угла α между этими направлениями. Степень увеличения потерь при индукции 1,50—1,70 Т при разных углах для стали марки Э330 показана на рис. 8-8. С изменением угла изменяются только потери от

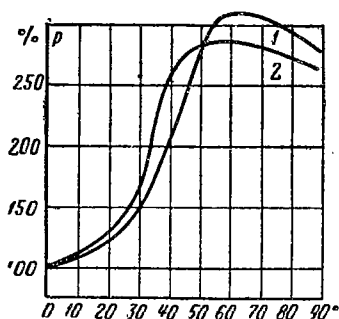


Рис. 8-8. Изменение удельных потерь в стали марки Э330 0,35 мм в зависимости от угла α между направлениями вектора магнитной индукции и прокатки стали.

1 — $B=1,5$ Т; 2 — $B=1,7$ Т.

гистерезиса. Потери от вихревых токов не зависят от этого угла. Поэтому в стали с толщиной листов 0,5 мм, для которой потери от гистерезиса составляют меньшую часть общих потерь, общие потери с изменением угла α изменяются в меньшей степени, чем в стали толщиной 0,35 мм.

Пластины для стержней и ярм вырезаются из листов стали так, чтобы продольная ось пластины была параллельна большей стороне листа, т. е. совпадала с направлением прокатки. При этом в стержнях и большей части объема ярм направление вектора индукции магнитного поля будет совпадать с направлением прокатки (рис. 8-9). При сборке магнитной системы из пластин прямоугольной формы с прямыми стыками по рис. 8-9, а, в в частях ярм, заштрихованных на этом рисунке, угол α будет изменяться от 0 до 90°. Общее увеличение удельных потерь в среднем по всему объему заштрихованных частей в углах магнитной системы можно оценить коэффициентом $k_{п.у}$, зависящим от марки стали, толщины листов, индукции и различных для отожженной и неотожженной стали. При косых стыках по рис. 8-9, б в углах магнитной системы также возникают добавочные потери, меньшие, чем при прямых стыках. В этом случае зона несовпадения направления индукционных линий с направлением прокатки ограничивается меньшим объемом стали, прилегающим к стыку пластин. Для диапазона индукции 1,40—1,70 Т коэффициент $k_{п.у}$ для прямых и косых стыков может быть принят по табл. 8-5.

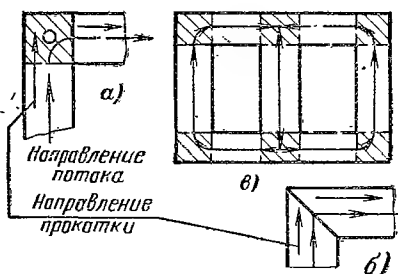


Рис. 8-9. Части магнитной системы, в которых возникают увеличенные потери в холоднокатаной стали при прямых и косых стыках.

Непосредственно в зоне стыка в шихтованной магнитной системе происходит увеличение индукции и часть индукционных линий из одной пластины в другую переходит перпендикулярно поверхности пластин (рис. 8-10). Вследствие этого непосредственно в зоне стыка возникают добавочные потери, которые определяются по общей поверхности стыка (зазора) и удельным потерям на 1 см² поверхности. Эти удельные потери p_3 (Вт/см²) для холоднокатаной стали приведены в табл. 8-4. Индукция для определения p_3 при прямых стыках принимается

Коэффициент $k_{п.у}$, учитывающий увеличение потерь в углах магнитной системы для стали разных марок при косом и прямом стыках (для $B=1,4 \div 1,7$ Т)

Стык	$k_{п.у}$	Холоднокатаная сталь					
		Для марки			Для удельных потерь, Вт/кг		
		Э320	Э330	Э330А	1,06—1,11	0,93—0,96	0,86—0,89
Косой	$k'_{п.у}$	1,15	1,22	1,28	1,34	1,38	1,46
Прямой	$k''_{п.у}$	1,60	1,78	1,90	2,00	2,14	2,32

Примечание. Толщина листов стали марок Э320, Э330 и Э330А 0,35 мм, других марок сталей 0,35—0,28 мм, сталь характеризуется маркой или удельными потерями при $f=50$ Гц и $B=1,5$ Т.

равной индукции в стержне для стыков, перпендикулярных оси стержня, и — индукции в ярме для стыков, перпендикулярных оси ярма. Для косых стыков следует принимать $B=B_c/\sqrt{2}$, где B_c — индукция в стержне.

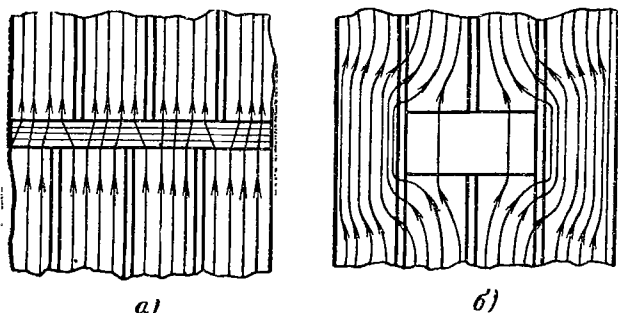


Рис. 8-10. Немagnetный зазор.

а — в стыковой магнитной системе; б — в шихтованной магнитной системе.

Площадь зазора (стыка) P_z принимается для прямых стыков равной активному сечению стержня P_c или ярма $P_{я}$; для косых стыков $P_z = \sqrt{2}P_c$. Форма сечения ярма может влиять на распределение индукции по сечению ярма и стержня (см. § 2-2). Если число ступеней в сечении ярма равно или отличается на одну-две ступени от числа ступеней в сечении стержня, то распределение индукции в ярме и стержне можно считать равномер-

ным и принять коэффициент увеличения потерь, зависящий от формы сечения ярма, $k_{п.я}=1,0$. Для ярма прямоугольной формы или с двумя-тремя ступенями $k_{п.я}=1,08$.

Некоторые технологические факторы также оказывают влияние на потери холостого хода. Необходимость расшихтовки верхнего ярма перед насадкой обмоток и зашихтовки его после насадки также приводит к увеличению потерь, что может быть учтено коэффициентом $k_{п.ш}=1,02$ для трансформаторов мощностью менее 25 000 кВ·А и $k_{п.ш}=1,03÷1,05$ при мощностях 25 000 кВ·А и выше. Опрессовка стержней и ярм при помощи бандажей при сборке остова вызывает некоторое увеличение потерь, которое уже не может быть снято отжигом. Это увеличение учитывается коэффициентом $k_{п.п}$, который для трансформаторов мощностью до 630 кВ·А может быть принят $k_{п.п}=1,02$, а для трансформаторов мощностью 1000—63 000 кВ·А $k_{п.п}=1,03÷1,05$. Закатка или срезание заусенцев после резки пластин вызывает увеличение потерь, которое при отсутствии отжига может быть учтено коэффициентом $k_{п.з}=1,07$. При резке пластин возникает увеличение удельных потерь, полностью снимаемое отжигом. При отсутствии отжига это увеличение для диапазона индукций 1,10—1,70 Т можно учесть коэффициентом $k_{п.р}$ для следующих значений ширины пластин (для холоднокатаной стали всех марок с толщиной листа 0,35) при отношении длины пластины к ее ширине от 3 до 6:

5 см	1,20	30 см	1,033
10 см	1,10	40 см	1,025
20 см	1,05	50 см	1,020

При определении $k_{п.р}$ принимается ширина пластины второго пакета от центра сечения стержня. Если пластины стали после резки и закатки или срезания заусенцев подвергаются отжигу, то произведение коэффициентов $k_{п.з}k_{п.р}=1,00$.

В связи с необходимостью учета увеличения потерь в холоднокатаной стали в углах ярм, т. е. в частях ярм, заштрихованных на рис. 8-9, в, определение массы стали и потерь в магнитной системе в этом случае удобно производить в следующем порядке.

Масса стержней определяется по (8-16) (для ярма с прямоугольной формой сечения $G_c''=0$), и потери в них рассчитываются как обычно по индукции стержня и таб-

личным данным удельных потерь p_c для стали применяемой марки.

Масса ярм разделяется на две части. Масса стали частей, заштрихованных на рис. 8-9, для трехфазного трансформатора равна шестикратной и для однофазного трансформатора — четырехкратной массе угла G_y , определяемой по (8-11) или (8-12). Масса стали незаштрихованных частей определяется как разность $G'_я - 4G_y$ для трехфазного и $G'_я - 2G_y$ для однофазного трансформатора. Следовательно, полная масса стали двум ярм может быть представлена для трехфазного трансформатора в виде

$$G_я = (G'_я - 4G_y) + 6G_y; \quad (8-30)$$

для однофазного трансформатора в виде

$$G_я = (G'_я - 2G_y) + 4G_y. \quad (8-30')$$

В той части массы стали ярм, которая определяется разностью, стоящей в скобках в правой части (8-30), возникают потери, определяемые обычным путем по индукции в ярме и удельным потерям $p_я$. В массе стали углов помимо потерь, определяемых таким же путем, возникают добавочные потери, зависящие от прямой или косой формы стыков пластин стержней и ярм.

Для плоской магнитной системы современной стержневой конструкции с взаимным расположением стержней и ярм по рис. 2-6, а или 2-6, д, со стяжкой стержней и ярм бандажами или с прессовкой стержней расклиниванием с обмоткой, а ярм — ярмовыми балками, не имеющей сквозных шпилек в стержнях и ярмах, изготовленной из холоднокатаной стали, потери холостого хода, Вт, могут быть рассчитаны по формуле

$$P_x = k_{п.я} k_{п.ш} k_{п.п} k_{п.з} k_{п.р} \left[p_c G_c + p_я (G'_я - k_\Phi G_y) + \right. \\ \left. + \frac{p_c + p_я}{2} G_y (k_{кос} k'_{п.у} + k_{пр} k'_{п.у}) + \Sigma P_s n_s \Pi_s \right], \quad (8-31)$$

где для трехфазного трансформатора $k_\Phi = 2(c-1) = 4$; для однофазного трансформатора $k_\Phi = 2(c-1) = 2$;

$k_{кос}$ — число углов с косым стыком;

$k_{пр}$ — число углов с прямым стыком;

n_z — число немагнитных зазоров с данной формой стыка.

Выражение $k_{у.п} = k_{кос} k'_{п.у} + k_{пр} k''_{п.у}$ может быть заранее рассчитано для различного сочетания числа косых и прямых стыков. Для стали марок Э320, Э330 и Э330А с толщиной листов 0,35 мм и некоторых других с толщиной листов 0,35—0,28 мм при индукциях 1,4—1,7 Т значения этого коэффициента приведены в табл. 8-6.

Таблица 8-6

Значения коэффициента $k_{у.п} = k_{кос} k'_{п.у} + k_{пр} k''_{п.у}$ для различного числа косых и прямых стыков плоской шихтованной магнитной системы (для $B = 1,4 \div 1,7$ Т)

Число стыков		Холоднокатаная сталь					
Косых	Прямых	Для марки			Для удельных потерь, Вт/кг		
		Э320	Э330	Э330А	1,03—1,11	0,93—0,96	0,86—0,89

Трехфазная магнитная система ($c=3$)

6	—	6,90	7,32	7,68	8,04	8,28	8,76
4	2	7,80	8,44	8,92	9,36	9,80	10,48
—	6	9,60	10,68	11,40	12,00	12,84	13,92

Однофазная магнитная система ($c=2$)

4	—	4,60	4,88	5,12	5,36	5,52	5,84
—	4	6,40	7,12	7,60	8,00	8,56	8,28

Примечание. Сталь характеризуется маркой или удельными потерями при $f=50$ Гц и $B=1,5$ Т.

При проведении предварительного расчета по обобщенному методу гл. 3 желательно иметь для определения потерь холостого хода более удобную на этом этапе расчета, но достаточно точную формулу. Произведение коэффициентов, стоящих в формуле (8-31) перед общей скобкой с учетом того, что потери в зоне зазоров, определяемые как $\Sigma r_3 n_3 P_3$, составляют от 2 до 4% полных потерь холостого хода и могут быть учтены соответствующим коэффициентом, может быть рассчитано в соответствии с предыдущими указаниями данного параграфа.

фа и заменено одним коэффициентом $k_{п.д}$. В этом случае из (8-31) получаем:

$$P_x = k_{п.д} p_c \left(G_c + G_y \frac{k_{y.п}}{2} \right) + \\ + k_{п.д} p_y \left[G_y - (k_\phi + 2) G_y + \frac{k_{y.п} G_y}{2} \right], \quad (8-32)$$

где для пластин с отжигом и ярма с многоступенчатой формой сечения $k_{п.д}=1,08$; для ярма с прямоугольной формой сечения $k_{п.д}=1,16$; без отжига пластин соответственно $k_{п.д}=1,16$ и $1,25$.

Прокатка отверстий в пластинах для сквозных шпилек стяжки стержней и ярм приводит к увеличению потерь холостого хода, которое может быть учтено введением коэффициента $k_{п.о}$ перед прямоугольной скобкой в (8-31). Этот коэффициент зависит от толщины листов стали, индукции, диаметра отверстий, ширины листа и шага отверстий по оси стержня. Для холоднокатаной стали с толщиной листов 0,5 мм при шагах отверстий 12; 24 и 48 см он может колебаться от 1,01—1,05 до 1,14—1,35 и для стали с толщиной листов 0,35 мм — от 1,01—1,04 до 1,08—1,25. В конструкциях современных трансформаторов стяжка сквозными шпильками стержней и ярм не применяется.

Следует заметить, что толщина листов электротехнической стали, из которых будет собрана магнитная система, согласно ГОСТ 802-58 может отличаться от расчетной в пределах $\pm 6-8\%$ для холоднокатаной и $\pm 8-10$ для горячекатаной стали. Эти отклонения могут вызвать некоторое изменение коэффициента заполнения и индукции в магнитной системе, что в свою очередь приведет к отклонению действительных потерь холостого хода от расчетных.

Отклонение действительных потерь в готовом трансформаторе от расчетных может быть также следствием нестабильности качества стали, большего или меньшего увеличения потерь вследствие механических воздействий при заготовке пластин и сборке системы и других причин. Влияние этих факторов может складываться или вычитаться, но, как правило, в правильно рассчитанном трансформаторе отклонение действительных потерь от расчетных составляет в среднем не более $\pm 5-8\%$. Учитывая эти отклонения, в тех случаях, когда предель-

ное значение потерь холостого хода трансформатора задано, расчетные потери следует выдерживать в пределах нормы ГОСТ или технических условий плюс половина допуска. Согласно ГОСТ 11677-75 для потерь холостого хода в готовом трансформаторе установлен допуск $+15\%$. Таким образом, в расчете следует выдерживать потери холостого хода в пределах нормы соответствующего ГОСТ плюс $7,5\%$.

Пространственная магнитная система по рис. 2-7, а, изображенная также на рис. 8-11, имеет свои особенности в распределении магнитного потока в стержнях и ярмах, которые должны учитываться при расчете потерь и тока холостого хода. Вследствие того что ярмо этой системы имеет прямоугольную форму поперечного сечения при многоступенчатом сечении стержня, а также вследствие необычного стыкования торцовых поверхностей прямоугольных пакетов стержня с разными кольцевыми пакетами (слоями) ярма (рис. 8-3), возникает неравномерное распределение индукции по сечению стержня и ярма (рис. 8-12). Возникающие при этом добавочные потери, как показали исследования, могут быть учтены при расчете потерь путем умножения потерь в стержнях на $k_{п.л.с} = 1,04$ и потерь в ярмах на $k_{п.н.я} = 1,26$.

При соединении первичной обмотки (обмотки ВН) в звезду без нулевого провода третья гармоническая тока холостого хода не может протекать в первичной об-

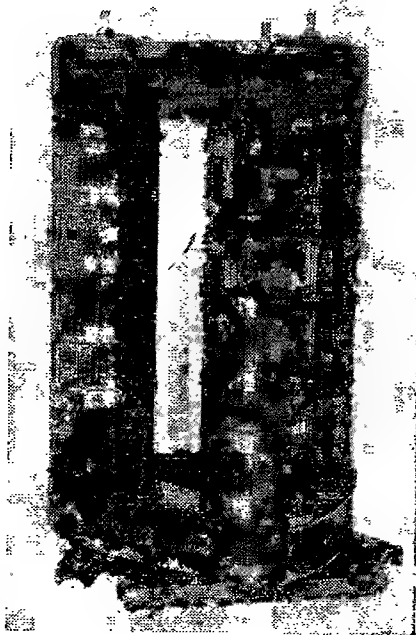


Рис. 8-11. Остов трансформатора со стыковой пространственной магнитной системой.

мотке, что приводит к появлению третьей гармонической магнитного потока в магнитной системе. Эта составляющая магнитного потока вытесняется из параллельно соединенных стержней в кольцевые ярма, где ее начальная фаза совпадает с начальной фазой первой гармонической. В результате максимальное значение магнитного потока и индукции в ярмах уменьшается в 1,14 раз (рис. 8-13), что приводит к уменьшению удельных потерь

в стали ярм $p_{я}$ и при расчете учитывается уменьшением индукции в ярмах.

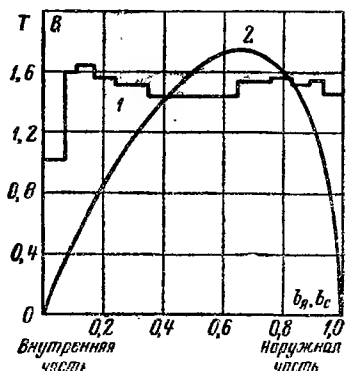


Рис. 8-12. Распределение индукции в стыковой пространственной магнитной системе.

1 — по пакетам стержня; 2 — по кольцевым пакетам (слоям) ярма.

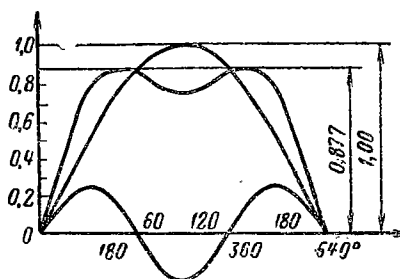


Рис. 8-13. Форма кривой магнитного потока в ярме пространственной магнитной системы.

(первая гармоническая; третья гармоническая; результирующая кривая).

Индукция в стержнях в этом случае рассчитывается по (8-28). Первая гармоническая индукции в прямых участках ярм может быть найдена по

$$B_{я1} = B_c \frac{\Pi_c}{\Pi_{я} \sqrt{3}}. \quad (8-33)$$

Максимальная индукция в прямых участках ярм с учетом третьей гармонической $B_{я}$ определяется как

$$B_{я} = \frac{B_{я1}}{1,14} = 0,877 B_{я1}. \quad (8-34)$$

Расчетная индукция в углах магнитной системы B_y находится с учетом индукции стержней и прямых участков ярм

$$B_y = 0,87 \frac{B_c + B_{я1}}{2}. \quad (8-35)$$

Появление третьей гармонической магнитного потока в ярмах приводит также к искажению формы кривой $\Phi=f(t)$, к увеличению удельных потерь в стали и общих потерь в ярмах. Это увеличение потерь учитывается путем введения коэффициента $k_{п.и}$ к потерям в ярмах, равного

$$k_{п.и} = 1 + 0,55 \left(\frac{k_f^2}{1,11^2} - 1 \right), \quad (8-36)$$

где множитель 0,55 учитывает долю потерь от вихревых токов в общих потерях в стали;

k_f — коэффициент формы кривой индукции, который для диапазона индукций $B_{я}$ от 1,1 до 1,5 Т может быть принят от 1,3 до 1,43.

Коэффициент $k_{п.и}$ в диапазоне максимальных индукций в прямых участках ярма $B_{я}$ от 1,1 до 1,3 Т равен от 1,19 до 1,275 и в диапазоне $B_{я}$ от 1,3 до 1,5 Т равен от 1,275 до 1,363 с линейной интерполяцией для промежуточных значений.

Изготовление ярм путем навивки из холоднокатаной ленты связано с механическими воздействиями на материал и с существенными остаточными деформациями ленты, что приводит к значительному ухудшению ее магнитных свойств. Поэтому восстановительный отжиг навитых ярм в печах длительного действия является совершенно необходимым. При отсутствии отжига навитых ярм следует считаться с возможным увеличением потерь до двукратных и с существенно большим увеличением тока холостого хода. Пластины стержней должны подвергаться отжигу в проходных рольганговых печах.

При расчете потерь холостого хода следует учитывать также технологический фактор, т. е. увеличение потерь вследствие механических воздействий на пластины стали после отжига при сборке остова и всего трансформатора, несовершенство восстановительного отжига и т. д. Этот фактор может быть учтен путем введения коэффициента $k_{п.т}$, зависящего от разных причин и в том числе от уровня культуры производства того или иного завода. Этот коэффициент может быть принят $k_{п.т}=1,06$.

С учетом сделанных замечаний формула для расчета потерь холостого хода в пространственной магнитной

системе по рис. 8-11 может быть представлена в виде

$$P_x = k_{п.т} [G_c p_c k_{п.н.с} + G_y p_y k_{п.н} k_{п.н.я} + 6G_y k_{п.н} k_{п.н.я} (p_y k''_{п.у} - p_y)]. \quad (8-37)$$

Удельные потери в стали стержней, прямых участков ярм и углов магнитной системы p_c , p_y и p_u определяются по табл. 8-4 для стали соответствующей марки по индукциям B_c , B_y и B_u . Коэффициент $k''_{п.у}$ выбирается по табл. 8-5 для той же стали.

При проведении предварительного расчета по обобщенному методу гл. 3 можно использовать формулу (8-37) в преобразованном виде:

$$P_x = k'_c G_c + k'_y G_y + k'_y G_y, \quad (8-38)$$

где коэффициенты k'_c , k'_y и k'_y рассчитанные для формулы (8-37) для стали Э330А, индукции в стержне B_c от 1,5 до 1,65 Т и для первой гармонической индукции в прямых участках ярм $B_{я1} = (1,0 \div 0,9) B_c$, могут быть взяты из табл. 8-7. Для других сталей эти коэффициенты могут быть подсчитаны на основании формулы (8-37).

При расчете потерь холостого хода в пространственной магнитной системе по рис. 2-7, б, состоящей из трех навитых колец, следует учитывать, что при расчетной индукции в стержне B_c первая гармоническая индукции в

Таблица 8-7

Значения коэффициентов k'_c , k'_y и k'_y в формуле (8-38) для пространственной магнитной системы. Сталь Э330А

Коэффициенты		Индукция в стержне B_c , Т			
		1,5	1,55	1,6	1,65
k'_c		1,21	1,32	1,45	1,61
k'_y	$B_{я1} = B_c$	1,43	1,55	1,68	1,81
	$B_{я1} = 0,95B_c$	1,27	1,37	1,48	1,59
	$B_{я1} = 0,9B_c$	1,04	1,16	1,29	1,41
k'_y	$B_{я1} = B_c$	5,65	6,08	6,60	7,05
	$B_{я1} = 0,95B_c$	5,70	6,12	6,82	7,27
	$B_{я1} = 0,9B_c$	5,78	6,35	7,05	7,60

отдельных кольцах $B_{\text{кл}}$ в $2/\sqrt{3} = 1,15$ раз больше (см. § 2-1), т. е. $B_{\text{кл}} = 1,15 B_{\text{с}}$. При этом в каждом из навитых колец возникает третья гармоническая магнитного потока по рис. 8-13 и максимальное значение индукции уменьшается в 1,14 раз. Таким образом, максимальную индукцию, определяющую удельные потери в стали, в такой магнитной системе можно принять равной расчетной индукции $B_{\text{к}} = B_{\text{с}}$.

Искажение формы кривой магнитного потока и индукции в этом случае можно учесть введением коэффициента $k_{\text{п.и}}$, рассчитываемого по (8-36). Для диапазона индукции $B_{\text{к}}$ от 1,5 до 1,65 Т для стали Э330 коэффициент k_f можно принять равным от 1,43 до 1,46 и коэффициент $k_{\text{п.и}} = 1,37 \div 1,40$.

Для учета технологического фактора можно ввести коэффициент $k_{\text{п.т}} = 1,06$.

Поскольку в рассматриваемой магнитной системе понятие угла не имеет места и однородность каждого кольца при расчете потерь позволяет не разделять его на стержни и ярма, формула для расчета потерь в окончательном и предварительном расчете получает вид

$$P_{\text{x}} = k_{\text{п.т}} k_{\text{п.и}} \rho_{\text{с}} G_{\text{ст}}, \quad (8-39)$$

где масса стали магнитной системы $G_{\text{ст}}$ определяется по (8-25).

8-3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРА

Ток первичной обмотки трансформатора, возникающий при холостом ходе при номинальном синусоидальном напряжении и номинальной частоте, называется током холостого хода.

При расчете тока холостого хода трансформатора отдельно определяют его активную и реактивную составляющие.

Активная составляющая тока холостого хода вызывается наличием потерь холостого хода. Активная составляющая тока, А,

$$I_{\text{x.а}} = P_{\text{x}} / m U_{\text{ф}}, \quad (8-40)$$

где $U_{\text{ф}}$ — фазное напряжение первичной обмотки, В;
 P_{x} — потери холостого хода, Вт.

Обычно определяют не абсолютное значение тока холостого хода и его составляющих, а их относительное значение по отношению к номинальному току трансформатора i_0 , i_{0a} , i_{0p} , выражая их в процентах номинального тока.

Тогда активная составляющая, %,

$$i_{0a} = \frac{I_{x.a}}{I_{\phi}} 100 = \left(\frac{P_x}{mU_{\phi}} : \frac{S}{mU_{\phi}} \right) 100 = \frac{P_x}{S} 100,$$

или

$$i_{0a} = P_x / 10S, \quad (8-41)$$

где S — мощность трансформатора, кВ·А; P_x — в Вт.

Расчет реактивной (намагничивающей) составляющей тока холостого хода усложняется наличием в магнитной цепи трансформатора немагнитных зазоров. При этом расчете магнитная система трансформатора разбивается на четыре участка — стержни, ярма за исключением углов магнитной системы, углы и зазоры. Для каждого из этих участков подсчитывается требуемая намагничивающая мощность, суммируемая затем по всей магнитной системе. Так же как и потери, ток холостого хода зависит от основных магнитных свойств стали магнитной системы и от ряда конструктивных и технологических факторов, оказывающих на ток холостого хода существенно большее влияние, чем на потери.

При расчете тока холостого хода для плоской шихтованной магнитной системы, собранной из пластин горячекатаной стали, не имеющей заметной анизотропии магнитных свойств, намагничивающая мощность для стержней и ярм, включая углы магнитной системы, определяется как произведение соответствующей удельной намагничивающей мощности, находимой для выбранной марки стали и индукции q_c или q_y на массу стали стержней или ярм данной магнитной системы.

Немагнитные зазоры в шихтованной магнитной системе имеют особую форму — в месте зазора стыки пластин чередуются со сквозными пластинами (рис. 8-10, б). Магнитный поток в месте стыка проходит, частично через зазор между пластинами и частично — через соседнюю сквозную пластину. Индукция в сквозных пластинах в зоне, лежащей против стыков, увеличивается. Вместе с этим происходит местное увеличение потерь и намагничивающей составляющей тока холостого хода, однако общая намагничивающая мощность для

зазора оказывается существенно меньшей, чем при стыке частей стыковой магнитной системы по рис. 8-10, а.

В практике расчета намагничивающая мощность для зазоров шихтованных магнитных систем, собираемых из пластин горячекатаной или холоднокатаной стали, определяется для условного немагнитного зазора, подобного зазору по рис. 8-10, а, по площади сечения стали в данном стыке, т. е. по активному сечению стержня или ярма и по удельной намагничивающей мощности, отнесенной к единице площади активного сечения q_z , В·А/кг, и определяемой экспериментально для каждой марки стали.

Полная намагничивающая мощность трансформатора, В·А, для магнитной системы из горячекатаной стали может быть выражена следующей формулой:

$$Q_x = Q_{x.c} + Q_{x.y} + Q_{x.z} = q_c G_c + q_y G_y + \Sigma n_z q_z P_z, \quad (8-42)$$

где q_c и q_y — удельные намагничивающие мощности для стержня и ярма, определяемые по табл. 8-8 для стали горячей прокатки в зависимости от соответствующих индукций, В·А/кг;

G_c и G_y — массы стали в стержнях и ярмах, кг;
 n_z — число немагнитных зазоров (стыков) в магнитной системе;

q_z — удельная намагничивающая мощность, В·А/см², для немагнитных зазоров, определяемая для индукции в стержне или ярме по табл. 8-8;

P_z — площадь зазора, т. е. активное сечение стержня или ярма, см².

При расчете тока холостого хода для магнитной системы, собранной из пластин холоднокатаной стали, так же как и при расчете потерь холостого хода, приходится считаться с факторами конструктивными — форма стыков стержней и ярм, форма сечения ярма — и технологическими — расшихтовка и зашихтовка верхнего ярма, опрессовка магнитной системы, закатка заусенцев, резка пластин и проштамповка отверстий, отжиг пластин. Ток холостого хода изменяется от воздействия этих факторов в принципе так же, как и потери холостого хода, т. е. увеличивается при несовпадении направления индукционных линий с направлением прокатки пластин и в результате механических воздействий при заготовке плас-

Удельная намагничивающая мощность для стали марок Э41, Э42 и Э43 0,35 и 0,5 мм и для зазоров магнитных систем, собранных впереплет, из стали этих марок.

В, Т	Сталь q , В·А/кг	Зазор q_3 , В·А/см ²	В, Т	Сталь q , В·А/кг	Зазор q_3 , В·А/см ²
0,700	2,25	0,125	1,120	7,10	0,850
0,720	2,35	0,135	1,140	7,70	0,924
0,740	2,45	0,145	1,160	8,40	1,004
0,760	2,55	0,157	1,180	9,20	1,090
0,780	2,65	0,172	1,200	10,0	1,176
0,800	2,75	0,188	1,220	11,0	1,278
0,820	2,87	0,208	1,240	12,0	1,382
0,840	2,99	0,228	1,260	13,14	1,491
0,860	3,14	0,251	1,280	14,42	1,606
0,880	3,32	0,277	1,300	15,7	1,722
0,900	3,50	0,303	1,320	17,42	1,858
0,920	3,70	0,335	1,340	19,14	1,994
0,940	3,90	0,369	1,360	21,16	2,141
0,960	4,12	0,407	1,380	23,48	2,299
0,980	4,36	0,449	1,400	25,8	2,457
1,000	4,60	0,491	1,420	28,68	2,637
1,020	4,92	0,543	1,440	31,56	2,819
1,040	5,24	0,595	1,460	35,1	3,012
1,060	5,62	0,652	1,480	39,3	3,216
1,080	6,06	0,714	1,500	43,5	3,420
1,100	6,50	0,776			

тин и сборке остова. Отжиг пластин ведет к уменьшению тока холостого хода. На токе холостого хода влияние этих факторов сказывается более резко, чем на потерях холостого хода.

Для плоской магнитной системы современной стержневой конструкции с взаимным расположением стержней и ярм по рис. 2-6, а или д, со стяжкой стержней и ярм бандажами или с прессовкой стержней расклиниванием с обмоткой, а ярм — ярмовыми балками, не имеющей сквозных шпилек в стержнях и ярмах, изготовленной из холоднокатаной стали, намагничивающая мощность холостого хода может быть рассчитана по формуле

$$Q_x = k_{т.я} k_{т.ш} k_{т.п} \left\{ k_{т.з} k_{т.р} \left[q_c G_c + q_y (G'_y - k_{ф} G_y) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{q_c + q_y}{2} G_y (k_{кос} k'_{т.у} + k_{пр} k''_{т.у}) \right] + \sum q_3 n_3 \Pi_3 \right\}, \quad (8-43)$$

- где G_c , $G'_я$ и G_y — массы стали стержней и отдельных частей ярм, определяемые так же, как и при расчете потерь холостого хода, кг;
- q_c и $q_я$ — удельные намагничивающие мощности для стали стержней и ярм по табл. 8-11, В·А/кг;
- $q_з$ — удельная намагничивающая мощность для зазоров, определяемая по табл. 8-11 по индукциям для прямых и косых стыков аналогично $\rho_з$ при расчете потерь холостого хода, В·А/см²;
- $P_з$ — площадь зазора, определяемая так же, как и при расчете потерь холостого хода, см²;
- $k_{т.я}$ — коэффициент, учитывающий форму ярма. При числе ступеней в ярме $n_я$, равном или близком к числу ступеней в стержне, $k_{т.я} = 1,00$; при $n_я = 1 \div 3$ ступени $k_{т.я} = 1,08$;
- $k_{т.ш}$ — коэффициент, учитывающий расшихтовку и зашихтовку верхнего ярма при сборке. При мощности трансформатора до 25 000 кВ·А $k_{т.ш} = 1,02$; при мощности от 25 000 кВ·А и выше $k_{т.ш} = 1,03 \div 1,05$;
- $k_{т.п}$ — коэффициент, учитывающий влияние прессовки стержней и ярм при сборке остова. Для мощностей до 630 кВ·А $k_{т.п} = 1,04$; для мощностей от 1000 до 63 000 кВ·А $k_{т.п} = 1,06 \div 1,1$;
- $k_{т.з}$ — коэффициент, учитывающий срезку заусенцев. При отсутствии отжига $k_{т.з} = 1,6$; при отжиге $k_{т.з} = 1,10$;
- $k_{т.р}$ — коэффициент, учитывающий резку пластин. При отсутствии отжига этот коэффициент можно принять по табл. 8-9; при отжиге после резки пластин и закатки заусенцев $k_{т.р} = 1,00$;

Таблица 8-9

Коэффициент $k_{т.р}$, учитывающий влияние резки пластин холоднокатаной стали толщиной 0,35 мм на ток холостого хода при отсутствии отжига

Ширина пластин, см	$k_{т.р}$	Ширина пластин, см	$k_{т.р}$
5,0	1,38	30,0	1,04
10,0	1,25	40,0	1,03
20,0	1,10	50,0 и более	1,00

$k'_{т.у}$ и $k''_{т.у}$ — коэффициенты, учитывающие увеличение удельной намагничивающей мощности в углах магнитной системы соответственно при косом и прямом стыках; они могут быть взяты из табл. 8-10;

k_{ϕ} — коэффициент, учитывающий число стержней; для трехфазного трансформатора $k_{\phi}=4$; для однофазного $k_{\phi}=2$;

$k_{\text{кос}}$ — число углов магнитной системы с косым стыком;

$k_{\text{пр}}$ — число углов с прямым стыком.

Выражение $k_{у.т}=k_{\text{кос}}k'_{т.у}+k_{\text{пр}}k''_{т.у}$ может быть заранее рассчитано для различного сочетания числа косых и прямых стыков. Для стали марки Э330А с толщиной листов 0,35 мм при индукциях 1,4—1,7 Т значения этого коэффициента приведены в табл. 8-12.

Простамповка отверстий в пластинах приводит к увеличению тока холостого хода. Так же как и при расчете потерь холостого хода это влияние может быть учтено путем введения коэффициента $k_{т.о}$ перед прямой скобкой в формуле (8-43). Для тех же условий, что и при расчете потерь, этот коэффициент колеблется для стали толщиной 0,5 мм от 1,1—1,2 до 1,7—3,0 и для стали толщиной 0,35 мм от 1,05—1,35 до 1,5—2,2.

Таблица 8-10

Коэффициенты $k_{т.у}$, учитывающие увеличение намагничивающей мощности в углах магнитной системы для стали различных марок при косом и прямом стыках

Сталь (марка или удельные потери при $B=1,5$ Т, Вт/кг)	Косой стык $k'_{т.у}$				Прямой стык $k''_{т.у}$			
	Индукция В, Т				Индукция В, Т			
	1,4	1,5	1,6	1,7	1,4	1,5	1,6	1,7
Э320	1,45	1,70	2,40	2,90	2,1	2,85	4,50	5,50
Э330	1,75	2,10	2,95	4,20	2,9	3,75	5,75	8,60
Э330А	2,20	2,65	3,70	5,20	3,85	4,80	7,30	10,80
1,06—1,11	3,05	3,50	4,75	6,07	6,00	6,80	9,40	13,00
0,93—0,96	3,40	4,00	5,35	6,55	6,60	7,70	11,25	14,00
0,86—0,89	3,80	4,60	6,00	7,30	7,50	9,10	12,85	15,00

Примечания: 1. Толщина листов стали марок Э320, Э330 и Э330А 0,35 мм; других марок сталей 0,35—0,28 мм.

2. При $B=1,8$ Т $k_{т.у}$ уменьшается по сравнению со значением при $B=1,7$ Т на 15—20%.

Удельная намагничивающая мощность для холоднокатаной стали марок Э310, Э320, Э330 и Э330А по ГОСТ 802-58 при различных индукциях, $f=50$ Гц и для зазоров шихтованных магнитных систем

В, Т	$q, \text{В} \cdot \text{А/кг}$				$q_s, \text{В} \cdot \text{А/см}^2$	
	Э310	Э320	Э330	Э330А	Э320, Э330	Э330А
1,000	1,45	1,22	1,00	0,7	0,166	0,060
1,020	1,54	1,28	1,05	0,74	0,177	0,064
1,040	1,63	1,34	1,10	0,78	0,188	0,076
1,060	1,72	1,40	1,15	0,82	0,200	0,086
1,080	1,81	1,46	1,20	0,86	0,211	0,100
1,100	1,91	1,53	1,25	0,9	0,222	0,110
1,120	2,01	1,62	1,31	0,94	0,233	0,120
1,140	2,11	1,72	1,37	0,98	0,244	0,140
1,160	2,22	1,82	1,43	1,02	0,255	0,170
1,180	2,33	1,92	1,50	1,06	0,266	0,210
1,200	2,44	2,02	1,57	1,10	0,277	0,250
1,220	2,55	2,13	1,65	1,14	0,333	0,328
1,240	2,67	2,23	1,74	1,18	0,390	0,406
1,260	2,82	2,34	1,82	1,22	0,445	0,484
1,280	2,97	2,45	1,91	1,26	0,500	0,562
1,300	3,17	2,51	2,00	1,30	0,555	0,640
1,320	3,34	2,72	2,13	1,37	0,665	0,752
1,340	3,58	2,90	2,27	1,44	0,775	0,864
1,360	3,75	3,07	2,38	1,51	0,890	0,976
1,380	3,97	3,25	2,50	1,58	1,00	1,088
1,400	4,47	3,55	2,70	1,65	1,11	1,200
1,420	4,85	3,83	2,90	1,70	1,22	1,34
1,440	5,23	4,11	3,10	1,75	1,33	1,48
1,460	5,62	4,46	3,33	1,80	1,44	1,63
1,480	6,18	4,88	3,59	1,87	1,55	1,79
1,500	6,75	5,30	3,85	1,97	1,67	1,95
1,520	7,90	5,98	4,23	2,10	1,87	2,15
1,540	9,05	6,66	4,61	2,23	2,06	2,35
1,560	10,20	7,60	5,08	2,40	2,27	2,59
1,580	12,20	8,60	5,64	2,60	2,46	2,87
1,600	14,25	10,00	6,20	2,80	2,66	3,15
1,620	17,75	12,00	7,20	3,12	2,97	3,51
1,640	21,25	14,00	8,20	3,44	3,28	3,87
1,660	24,80	17,40	9,76	4,00	3,64	4,31
1,680	30,80	22,40	11,88	4,80	4,04	4,83

В, Т	q, В·А/кг				q _з , В·А/см ²	
	Э310	Э320	Э330	Э330А	Э320, Э330	Э330А
1,700	38,30	27,00	14,00	5,60	4,44	5,35
1,720	50,30	35,40	18,00	7,76	5,00	5,93
1,740	65,30	43,80	22,00	9,92	5,55	6,51
1,760	84,50	60,40	29,20	13,80	6,30	7,24
1,780	114,0	85,20	39,60	19,40	6,91	8,12
1,800	150,0	110,0	50,00	25,00	7,60	9,00
1,900	—	830,0	350,00	180,00	14,00	16,00

Примечания: 1. Сталь тех же марок с толщиной листов 0,5 мм имеет q такое же, как и сталь тех же марок толщиной 0,35 мм.

2. Для стали с толщиной листов 0,5 мм q_з, полученное из таблицы, умножить на 1,3.

3. При отсутствии других более точных данных этой таблицей можно пользоваться для определения удельных намагничивающих мощностей для импортной стали МБХ по графе для стали Э330А.

Таблица 8-12

Значения коэффициента $k_{y,т}$ для различного числа косых и прямых стыков плоской шихтованной магнитной системы. Сталь Э330А

Число стыков		Индукция В, Т			
Косых	Прямых	1,4	1,5	1,6	1,7

Трехфазная магнитная система (с=3)

6	—	13,20	15,90	22,20	31,20
4	2	16,50	20,20	29,40	42,40
—	6	23,10	28,80	43,80	64,80

Однофазная магнитная система (с=2)

4	—	8,80	10,60	14,80	20,80
—	4	15,40	19,20	29,20	43,20

Для использования в предварительном расчете по методу гл. 3 формула (8-43) может быть преобразована к виду

$$Q_x = k'_{т,д} k''_{т,д} q_c \left(G_c + \frac{k_{y,т}}{2} G_y \right) +$$

$$+ k'_{т.д} k''_{т.д} q_3 \left[G_y + \frac{k_{y.т}}{2} G_y - (k_{\phi} + 2) G_y \right] + \\ + k'_{т.д} \Sigma q_3 n_3 \Pi_3, \quad (8-44)$$

где $k'_{т.д} = k_{т.я} k_{т.ш} k_{т.п}$; $k''_{т.д} = k''_{т.д} k_{т.з} k_{т.р}$.

Для магнитной системы с многоступенчатой формой сечения ярма с отжигом пластин произведение коэффициентов $k'_{т.д} k''_{т.д} = 1,21$; без отжига пластин $k'_{т.д} k''_{т.д} = 1,94$. Для ярма с сечением прямоугольной формы или с 1—3 ступенями соответственно 1,31 и 2,10. Коэффициент $k'_{т.д}$ для многоступенчатого ярма при отжиге и без отжига равен 1,06 для трансформаторов до 630 кВ·А; 1,08 для 1000—16 000 кВ·А и 1,10 для 25 000—63 000 кВ·А. Для ярма прямоугольной формы эти значения коэффициентов умножаются на 1,08.

Удельная намагничивающая мощность q_3 определяется по индукции стержня B_c для прямых стыков и по индукции $B_c/\sqrt{2}$ для косых стыков. Сечение зазора $\Pi_3 = \Pi_c$ для прямых стыков и $\Pi_3 = \Pi_c \sqrt{2}$ для косых стыков; n_3 — число немагнитных зазоров с данной формой стыка.

В плоских стыковых магнитных системах из холоднокатаной стали расчет намагничивающей мощности можно вести по (8-43) с заменой последнего слагаемого в фигурной скобке на

$$Q_3 = \frac{n_3 \cdot 0,8 B_c \cdot \delta_3 \mu_B}{\sqrt{2}} 10^4, \quad (8-45)$$

где δ_3 — немагнитный зазор; $\delta_3 = \delta_{\pi} + 0,05$ см;

δ_{π} — толщина прокладки в стыке, см;

μ_B — напряжение одного витка обмотки, В.

В стыковой пространственной магнитной системе по рис. 2-7, а и рис. 8-11 большую часть — от 80 до 88% намагничивающей мощности для всей системы определяют немагнитные зазоры в стыках между стержнями и ярмами.

Намагничивающая мощность для зазора существенно зависит от действительного размера зазора, определяемого конструкцией стержней и ярм и технологией их

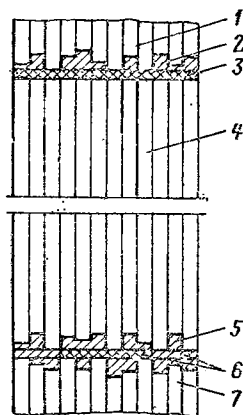


Рис. 8-14. Схемы стыков в пространственной магнитной системе.

1 — верхнее ярмо; 2 — верхний немагнитный зазор; 3 — немагнитная прокладка; 4 — стержень; 5 — нижний зазор, заполненный магнитным клеем ($\mu=2$); 6 — крестообразная немагнитная прокладка; 7 — нижнее ярмо.

сборки. На рис. 8-14 показана возможная схема организации стыков стержня с нижним и верхним ярмом. Одна из торцевых поверхностей стержня, в данном случае верхняя, при сборке на магнитной плите не имеет гребенчатой формы и может считаться плоской. Вторая торцевая поверхность стержня имеет вид гребенки с высотой выступов, определяемой допуском по длине пластин стержня при резке. Навитые ярма имеют гребенчатые стыковые поверхности. В верхнем и нижнем стыках проложены немагнитные прокладки толщиной 0,1—0,2 мм. Нижний стык стержня и ярма скреплен магнитным клеем с $\mu=2$. При такой схеме и размерах намагничивающая мощность для всей магнитной системы может быть рассчитана по формуле

$$Q_x = q_c G_c + q_y G_y + (k_{т.у}'' q_y - q_y) 6G_y + 7,5 \cdot 10^2 \delta \Pi_c B_c^2 \quad (8-46)$$

где G_c , G_y и G_u — массы стали стержней, ярма и угла, определяемые так же, как при расчете потерь холостого хода, кг;

q_c , q_y — удельные намагничивающие мощности, определяемые по индукциям в стержне B_c (q_c) и ярме B_y (q_y) по табл. 8-11, В·А/кг;

q_u — то же для углов при B_u по (8-35) по табл. 8-11, В·А/кг;

δ — расчетный немагнитный зазор, который для стыков по рис. 8-14 можно принять $\delta=0,0175$ см для трансформаторов 25—100 кВ·А и $\delta=0,0225$ для трансформаторов 160—630 кВ·А;

$k_{т.у}''$ — коэффициент по табл. 8-10;

Π_c — сечение стержня, см².

Формула (8-46) без дальнейших преобразований может быть использована при предварительном расчете по методу гл. 3.

Для пространственной навитой магнитной системы по рис. 2-7, б аналогично с формулой для расчета потерь холостого хода, для расчета намагничивающей мощности можно принять

$$Q_x = k_{т.т} q_c G_{ст}, \quad (8-47)$$

где $k_{т.т} = 1,05$ — коэффициент, учитывающий ухудшение магнитных свойств стали в результате механических воздействий на стальную ленту в процессе изготовления магнитной системы и несовершенство отжига.

Абсолютное фазное значение реактивной составляющей тока холостого хода, А,

$$I_{х.р} = Q_x / mU_{\phi}. \quad (8-48)$$

Относительное значение $i_{0р}$ в процентах номинального тока трансформатора (подобно активной составляющей $i_{0а}$)

$$i_{0р} = Q_x / 10S, \quad (8-49)$$

где S — полная мощность трансформатора, кВ·А.

Полный ток холостого хода:

абсолютное значение

$$I_x = \sqrt{I_{х.а}^2 + I_{х.р}^2}; \quad (8-50)$$

в процентах номинального тока

$$i_0 = \sqrt{i_{0а}^2 + i_{0р}^2}. \quad (8-51)$$

Полученное значение тока холостого хода должно быть сверено с предельно допустимым значением по ГОСТ или по заданию на расчет трансформатора. Отклонение расчетного значения тока холостого хода от заданного гарантийного следует допускать не более чем на половину допуска, разрешенного ГОСТ (по ГОСТ 11677-75 разрешенный допуск $+30\%$).

При расчете тока холостого хода по намагничивающей мощности определяется среднее значение тока холостого хода для всех стержней трансформатора. В симметричных магнитных системах, например однофазных, это среднее значение будет совпадать с действительным значением тока холостого хода для каждого стержня.

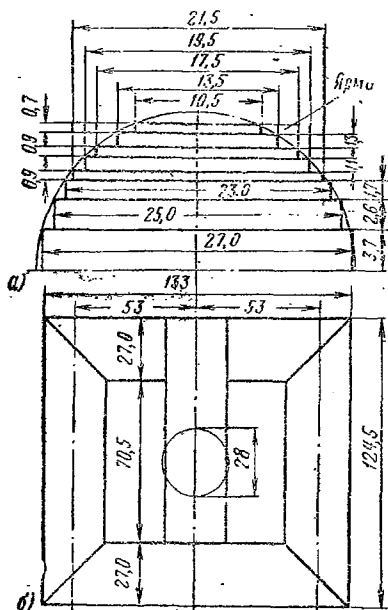


Рис. 8-15. Трансформатор ТМ-1600/35, вариант I_м, медные обмотки. Плоская магнитная система.

а — сечение стержня и ярма; б — основные размеры магнитной системы.

В несимметричных магнитных системах ток холостого хода для среднего стержня будет меньше, чем для крайних.

8-4. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТРАНСФОРМАТОРА

Трансформатор
ТМ-1600/35. Вариант I_м
(медные обмотки)

Определение размеров магнитной системы и массы стали (по § 8-1). Принята конструкция трехфазной плоской шихтованной магнитной системы, собираемой из пластин холоднокатаной текстурованной стали марки Э330А 0,35 мм по рис. 8-15. Стержни магнитной системы прессуются бандажами из стеклоленты, ярма — ярмовыми балками. Размеры пакетов выбраны по табл. 8-16 для стержня диаметром 28 см без прессующей пластины.

Размеры пакетов в одной половине сечения стержня при восьми ступенях:

№ пакета	Ширина пакета, см	Толщина пакета, см	Площадь сечения, см ²
1	27,0	3,7	99,9
2	25,0	2,6	65,0
3	23,0	1,7	39,1
4	21,5	0,9	19,35
5	19,5	1,1	21,45
6	17,5	0,9	15,75
7	13,5	1,3	17,55
8	10,5	0,7	7,35

$$\Sigma b_{\text{л}} = 12,9$$

$$\frac{P_{\text{ф.с}}}{2} = 285,45 \text{ см}^2$$

Полное сечение ярма по пакетам (или по табл. 8-2)

$$П_{ф.с} = 2 \cdot 285,45 = 570,9 \text{ см}^2;$$

активное сечение $П_c = 0,93 \cdot 570,9 = 530,9 \text{ см}^2$.

В сечении ярма 6 ступеней. Размеры пакетов ярма по табл. 8-16:

№ пакета	Ширина пакета, см	Толщина пакета, см	Площадь сече- ния, см ²
1	27,0	3,7	99,9
2	25,0	2,6	65,0
3	23,0	1,7	39,1
4	21,5	0,9	19,35
5	19,5	1,1	21,45
6	17,5	2,9	50,75

$$\Sigma b_n = 12,9$$

$$\frac{П_{ф.я}}{2} = 295,55 \text{ см}^2$$

Полное сечение ярма по пакетам (или по табл. 8-2)

$$П_{ф.я} = 2 \cdot 295,55 = 591,1 \text{ см}^2;$$

активное сечение $П_я = 0,93 \cdot 591,1 = 549,7 \text{ см}^2$.

Ширина ярма $b_я = \Sigma b_n \cdot 2 = 12,9 \cdot 2 = 25,8 \text{ см}$.

Длина стержня $l_c = l + 2l_0 = 55,5 + 2 \cdot 7,5 = 70,5 \text{ см}$.

Расстояние между осями соседних стержней

$$C = D_2'' + a_{22} = 49,8 + 3,0 = 52,8 \approx 53 \text{ см}.$$

Масса стали в ярмах по (8-15), (8-13) и (8-11):

$$G_я = G_я' + G_я'' = G_я' + 2G_y = 891,5 + 192,6 = 1084,1 \text{ кг};$$

$$G_я' = 2 \cdot 2 \cdot 53 \cdot 549,7 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} = 891,5 \text{ кг};$$

$$2G_y = 2 \cdot 2 \cdot 0,93 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} (27 \cdot 27 \cdot 3,7 + 25 \cdot 25 \cdot 2,6 + \\ + 23 \cdot 23 \cdot 1,7 + 21,5 \cdot 21,5 \cdot 0,9 + 19,5 \cdot 19,5 \cdot 1,1 + 17,5 \cdot 17,5 \cdot 0,9 + \\ + 13,5 \cdot 17,5 \cdot 0,9 + 10,5 \cdot 17,5 \cdot 0,7) = 2 \cdot 96,3 = 192,6 \text{ кг}.$$

Масса стали в стержнях по (8-16) — (8-18):

$$G_c = G_c' + G_c'' = 859 + 40 = 899 \text{ кг};$$

$$G_c' = 3 \cdot 530,9 \cdot 70,5 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} = 859 \text{ кг};$$

$$G_c'' = 3 (530,9 \cdot 27 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} - 96,3) = 40 \text{ кг}.$$

Полная масса стали трансформатора

$$G_{ст} = G_я + G_c = 1084,1 + 899 = 1983,1 \text{ кг}.$$

Расчет потерь холостого хода — по § 8-2.
Индукция в стержне

$$B_c = \frac{19,0 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 530,9} = 1,612 \text{ Т.}$$

Индукция в ярме

$$B_{я} = 1,612 \frac{530,9}{549,7} = 1,557 \text{ Т.}$$

Индукция в косом стыке

$$B_{ст} = \frac{1,612}{\sqrt{2}} = 1,14 \text{ Т.}$$

По табл. 8-4 находим удельные потери в стали:

при $B_c = 1,612 \text{ Т}$ $p_c = 1,36 \text{ Вт/кг}$; $p_{з.с} = 0,092 \text{ Вт/кг}$

при $B_{я} = 1,557 \text{ Т}$ $p_{я} = 1,21 \text{ Вт/кг}$; $p_{з.я} = 0,083 \text{ Вт/кг}$

при $B_{ст} = 1,14 \text{ Т}$ $p_{з.ст} = 0,027 \text{ Вт/см}^2$.

Для плоской магнитной системы с косыми стыками на крайних стержнях и прямыми на среднем стержне, с многоступенчатым ярмом, без отверстий для шпилек, с отжигом пластин после резки и удаления заусенцев применим для определения потерь формулу (8-31), в которой примем следующие коэффициенты: $k_{п.я} = 1,0$; $k_{п.ш} = 1,02$; $k_{п.п} = 1,03$; $k_{п.з} = 1,0$; $k_{п.р} = 1,0$; $k_{у.п} = 8,92$ (табл. 8-6).

$$P_x = k_{п.я} k_{п.ш} k_{п.п} k_{п.з} k_{п.р} \left[p_c G_c + p_{я} (G'_{я} - k_{ф} G_y) + \frac{p_c + p_{я}}{2} G_y k_{у.п} + \right. \\ \left. + \Sigma p_z n_z \Pi_z \right] = 1,0 \cdot 1,02 \cdot 1,03 \cdot 1,0 \cdot 1,0 [1,36 \cdot 899 + \\ + 1,21 (891,5 - 4 \cdot 96,3) + 1,29 \cdot 96,3 \cdot 8,92 + \\ + 0,027 \cdot 4 \cdot \sqrt{2} \cdot 530,9 + 0,092 \cdot 1 \cdot 530,9 + 0,083 \cdot 2 \cdot 549,7] = 3322 \text{ Вт,}$$

что на $\frac{3650 - 3322}{3650} 100 = 9\%$ ниже заданного значения.

Расчет тока холостого хода (по § 8-3).

По табл. 8-11 находим удельные намагничивающие мощности:

при $B_c = 1,612 \text{ Т}$ $q_c = 3,00 \text{ В} \cdot \text{А/кг}$; $q_{з.с} = 3,35 \text{ В} \cdot \text{А/см}^2$;

при $B_{я} = 1,557 \text{ Т}$ $q_{я} = 2,37 \text{ В} \cdot \text{А/кг}$; $q_{з.я} = 2,55 \text{ В} \cdot \text{А/см}^2$;

при $B_{ст} = 1,14 \text{ Т}$ $q_{з.ст} = 0,140 \text{ В} \cdot \text{А/см}^2$.

Для принятой конструкции и технологии изготовления магнитной системы применим формулу (8-43), в которой примем коэффи-

центы: $k_{т.я}=1,0$; $k_{т.ш}=1,02$; $k_{т.п}=1,06$; $k_{т.з}=1,10$; $k_{т.р}=1,0$; $k'_{т.у}=3,70$ (по табл. 8-10); $k''_{т.у}=7,30$ (по табл. 8-10) и $k_{у.т}=29,40$ (по табл. 8-12).

Полная намагничивающая мощность магнитной системы:

$$Q_x = k_{т.я} k_{т.ш} k_{т.п} \left\{ k_{т.з} k_{т.р} \left[q_c G_c + q_y (G'_y - k_\phi G_y) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{q_c + q_y}{2} G_y k_{у.т} \right] + \Sigma q_z n_z \Pi_z \right\} = 1,0 \cdot 1,02 \cdot 1,06 \cdot \{ 1,10 \cdot 1,0 \times \\ \times [3,00 \cdot 899 + 2,37 \cdot (891,5 - 4 \cdot 96,3) + 2,69 \cdot 96,3 \cdot 29,4] + \\ + 0,14 \cdot 4 \cdot \sqrt{2 \cdot 530,9} + 3,35 \cdot 1 \cdot 530,9 + 2,55 \cdot 2 \cdot 549,7 \} = \\ = 19\,068 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Ток холостого хода. Активная составляющая

$$i_{0a} = \frac{P_x}{10S} = \frac{3322}{10 \cdot 1600} = 0,21\%;$$

реактивная составляющая

$$i_{0p} = \frac{Q_x}{10S} = \frac{19\,068}{10 \cdot 1600} = 1,19\%;$$

ток холостого хода $i_0 = \sqrt{1,19^2 + 0,21^2} = 1,21\%$,

что на $\frac{1,40 - 1,21}{1,4} 100 = 13,6\%$ ниже заданного значения.

Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \left(1 - \frac{17\,207 + 3322}{1600 \cdot 10^3 + 17\,207 + 3322} \right) 100 = 98,73\%.$$

Трансформатор ТМ-1600/35. Вариант II_А (алюминиевые обмотки)

Трансформатор с пространственной магнитной системой по рис. 2-7, а. Стержни собраны из пластин одинаковой длины и скреплены бандажками из стеклотенты. Ярма — навитые (рис. 8-16).

Сечение стержня без прессующей пластины находится по табл. 8-16 при диаметре $d=26$ см. Число ступеней 8. Площадь сечения по табл. 8-2 с учетом центрального осевого отверстия $3 \times 3 = 9$ см²: $\Pi_{ф.с} = 490,6 - 9 = 481,6$ см²; активное сечение стержня $\Pi_c = 481,6 \times 0,93 = 448$ см².

Длина стержня $l_c = 90 + 2 \cdot 7,5 = 105$ см; расстояние между осями стержней $C = 52,4 + 3,0 = 55,4$ см.

Сечение ярма предварительно

$$\Pi'_{ф.я} = \frac{\Pi_{ф.с}}{\sqrt{3}} = \frac{481,6}{\sqrt{3}} = 278 \text{ см}^2.$$

Ширина ярма — по (8-4); δ — по табл. 8-16;

$$b_{\text{я}} = d - 2r - \delta = 26 - 3 - 1,1 = 21,9 \text{ см.}$$

Высота ярма по (8-5)

$$h_{\text{я}} = \frac{\Pi'_{\text{ф.я}}}{b_{\text{я}}} = \frac{278}{21,9} = 12,7 \text{ см;}$$

принимаем $h_{\text{я}} = 13,5$ см — ближайший больший нормированный размер ширины ленты холоднокатаной стали.

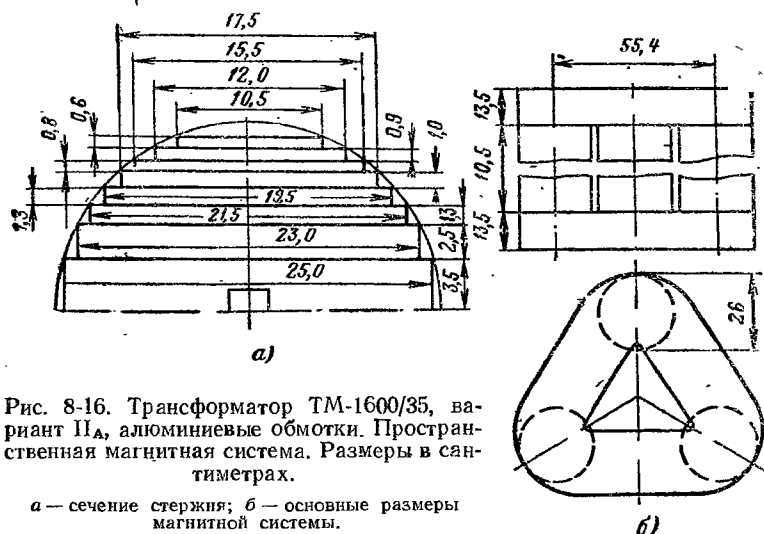


Рис. 8-16. Трансформатор ТМ-1600/35, вариант II_A, алюминиевые обмотки. Пространственная магнитная система. Размеры в сантиметрах.

а — сечение стержня; б — основные размеры магнитной системы.

Активное сечение ярма

$$\Pi_{\text{я}} = h_{\text{я}} b_{\text{я}} k_{\text{з}} = 13,5 \cdot 21,9 \cdot 0,95 = 281 \text{ см}^2;$$

$k_{\text{з}} = 0,95$ для жаростойкого покрытия без лаковой пленки.
Масса стали стержней

$$G_{\text{с}} = 3 \cdot 448 \cdot 105 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} = 1080 \text{ кг.}$$

Масса стали ярм по (8-20)

$$G_{\text{я}} = 2k_{\text{з}} \Pi'_{\text{я}} h_{\text{я}} \gamma_{\text{ст}} \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 0,95 \cdot 3957 \cdot 13,5 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} = 775 \text{ кг,}$$

$$\text{где } \Pi'_{\text{я}} = 3b_1 l_1 + 3b_2 l_2 + \pi(R_1^2 + R_2^2 - R_3^2) = 3 \cdot 10,4 \cdot 32,8 + \\ + 3 \cdot 11,5 \cdot 43,25 + \pi(11,5^2 + 20^2 - 8,5^2) = 3957 \text{ см}^2;$$

$$b_1 = \frac{d}{2} - r - \delta = \frac{26}{2} - 1,5 - 1,1 = 10,4 \text{ см;}$$

$$b_2 = \frac{d}{2} - r = \frac{26}{2} - 1,5 = 11,5 \text{ см};$$

$$l_1 = C - d \cos 30^\circ = 55,4 - 26 \cdot 0,867 \approx 32,8 \text{ см};$$

$$l_2 = C - (d - 8r) \cos 30^\circ = 55,4 - (26 - 12) \cdot 0,867 = 43,25 \text{ см};$$

$$R_1 = \frac{d}{2} - r = \frac{26}{2} - 1,5 = 11,5 \text{ см};$$

$$R_2 = d - 4r = 26 - 4 \cdot 1,5 = 20 \text{ см};$$

$$R_3 = \frac{d}{2} - 3r = \frac{26}{2} - 3 \cdot 1,5 = 8,5 \text{ см}.$$

Полная масса магнитной системы

$$G_{\text{ст}} = 1080 + 775 = 1855 \text{ кг}.$$

Масса стали одного угла магнитной системы по (8-22)

$$\begin{aligned} G_y &= (\Pi_c - 27,4 r^2 k_3) h_{\text{я}} \gamma_{\text{ст}} \cdot 10^{-6} = \\ &= (448 - 27,4 \cdot 1,5^2 \cdot 0,95) 13,5 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} = 40,7 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Потери холостого хода — по § 8-2. Индукция в стержнях по (8-28):

$$B_c = \frac{15,96 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 448} = 1,605 \text{ Т}.$$

Первая гармоническая индукция в прямых участках ярм по (8-33):

$$B_{\text{я}} = 1,605 \frac{448}{281 \sqrt{3}} = 1,475 \text{ Т}.$$

Максимальная индукция на этих участках по (8-34)

$$B_{\text{я}} = 0,877 \cdot 1,475 = 1,29 \text{ Т}.$$

Расчетная индукция в углах магнитной системы по (8-35)

$$B_y = 0,87 \frac{1,605 + 1,29}{2} = 1,29 \text{ Т}.$$

Коэффициент увеличения удельных потерь в ярмах вследствие влияния третьей гармонической по (8-36)

$$k_{\text{п.н}} = 1,0 + 0,55 \left(\frac{1,36^2}{1,11^2} - 1 \right) = 1,275.$$

Потери холостого хода по (8-37).

$$P_x = k_{п.т} [G_c p_c k_{п.н.с} + G_{я} p_{я} k_{п.и} k_{п.н.я} + 6G_y k_{п.и} k_{п.н.я} (p_y k_{п.у}'' - p_{я})] = \\ = 1,06 [1080 \cdot 1,34 \cdot 1,04 + 775 \cdot 0,808 \cdot 1,275 \cdot 1,26 + \\ + 6 \cdot 40,7 \cdot 1,275 \cdot 1,26 \cdot (0,808 \cdot 1,90 - 0,808)] = 2795 \text{ Вт},$$

где удельные потери p_c , $p_{я}$ и p_y определяются по табл. 8-4 для индукций B_c , $B_{я}$ и B_y : $p_c = 1,34 \text{ Вт/кг}$; $p_{я} = 0,808 \text{ Вт/кг}$; $p_y = 0,808 \text{ Вт/кг}$; $k_{п.т} = 1,06$; $k_{п.н.с} = 1,04$; $k_{п.н.я} = 1,26$; $k_{п.у}'' = 1,90$.

Ток холостого хода. Полная намагничивающая мощность по (8-46)

$$Q_x = q_c G_c + q_{я} G_{я} + (k_{т.у}'' q_y - q_{я}) 6G_y + 7,5 \cdot 10^2 \delta \Pi_c B_c = \\ = 2,88 \cdot 1080 + 1,28 \cdot 775 + (3,5 \cdot 1,28 - 1,28) \cdot 6 \cdot 40,7 + \\ + 7,5 \cdot 10^2 \cdot 0,025 \cdot 448 \cdot 1,605^2 = 26582 \text{ В} \cdot \text{А},$$

где удельные намагничивающие мощности q_c , $q_{я}$ и q_y находятся по табл. 8-11 при B_c , $B_{я}$ и B_y : $q_c = 2,88 \text{ В} \cdot \text{А/кг}$; $q_{я} = 1,28 \text{ В} \cdot \text{А/кг}$; $q_y = 1,28 \text{ В} \cdot \text{А/кг}$; $k_{т.у}'' = 3,5$ (по табл. 8-10 с экстраполяцией); $\delta = 0,025 \text{ см}$.

Активная составляющая тока холостого хода

$$i_{0a} = \frac{2960}{10 \cdot 1600} = 0,185\%.$$

Реактивная составляющая

$$i_{0p} = \frac{26582}{10 \cdot 1600} = 1,66\%.$$

Ток холостого хода

$$i_0 = \sqrt{1,66^2 + 0,185^2} = 1,67\%.$$

Глава девятая

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА

9-1. ПРОЦЕСС ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ТРАНСФОРМАТОРЕ

Во время работы трансформатора в его активных материалах — металле обмоток и стали магнитной системы — возникают потери энергии, выделяющиеся в виде тепла. Вследствие выделения тепла обмотки и магнитная система трансформатора начинают нагреваться, постепенно повышая свою температуру. Вместе с ростом тем-

пературы возникает температурный перепад между обмоткой или магнитной системой и окружающей средой — трансформаторным маслом или воздухом — и вследствие этого теплоотдача от активных материалов к окружающей среде. Таким образом, часть тепла, выделяющегося в активных материалах, идет на их нагревание и вторая часть отводится в окружающую среду. В масляных трансформаторах вслед за активными материалами нагреваются масло и металлический бак и устанавливается температурный перепад между внешней поверхностью бака и воздухом, окружающим трансформатор. По мере роста температуры накопление тепла постепенно уменьшается, а теплоотдача увеличивается, в конечном итоге при длительном сохранении режима нагрузки повышение температуры прекращается и все выделяющееся тепло отдается в окружающую среду.

При проектировании трансформаторов, предназначенных для длительной непрерывной нагрузки, а такими является подавляющее большинство силовых трансформаторов, тепловой расчет производится для установившегося теплового режима при номинальной нагрузке. Полученные при этом расчете значения превышения температуры над окружающей средой не должны быть больше предельных значений, регламентированных ГОСТ. Естественно, что для всех переходных режимов при нагрузках, не больших номинальной, превышения температуры будут лежать ниже, чем при номинальной нагрузке.

Тепловой поток проходит сложный путь, который для масляного трансформатора может быть разбит на следующие участки: 1) от внутренних точек обмотки или магнитной системы до их наружных поверхностей, омываемых маслом; на этом участке теплопередача происходит путем теплопроводности; 2) переход тепла с наружной поверхности обмотки или магнитной системы в омывающее их масло; 3) перенос тепла маслом от обмоток и магнитной системы к внутренней поверхности стенок бака, на этом участке тепло передается путем конвекционного тока масла, излучением тепла в масле практически можно пренебречь; 4) переход тепла от масла к внутренней поверхности стенок бака; 5) переход тепла от наружной поверхности стенок бака в окружающий воздух; на этом участке теплоотдача происходит путем излучения и конвекции. Если для охлаждения

трансформатора применяются водяные или воздушные теплообменники, то передача тепла в них к окружающей среде происходит только путем конвекции; излучением даже в воздушных теплообменниках можно пренебречь.

На каждом из участков, проходимых тепловым потоком, возникает температурный перепад или разность температур тем большая, чем больше тепловой поток. На участках, имеющих протяженность, например внутри обмотки, это разность температур начальной и конечной точек участка — наиболее нагретой внутренней точки обмотки и наружной поверхности обмотки. На участках, не имеющих протяженности, например на наружной поверхности обмотки, температурный перепад определяется разностью температур поверхности обмотки и омывающего ее масла. Изменение перепадов на различных участках с изменением потерь трансформатора определяется различными физическими законами.

Задача теплового расчета трансформатора заключается: 1) в определении перепадов температуры между обмотками и магнитной системой, с одной стороны, и маслом — с другой; 2) в подборе конструкции и размеров бака и системы охлаждения, обеспечивающих нормальную теплоотдачу всех потерь при температурах обмоток, магнитной системы и масла, не превышающих допустимые температуры; 3) в поверочном расчете превышений температуры обмоток, магнитной системы и масла над окружающим воздухом.

Для обоснования теплового расчета трансформатора с естественным масляным охлаждением необходимо более подробно рассмотреть путь теплового потока от обмотки до среды, охлаждающей трансформатор, т. е. до окружающего воздуха. На рис. 9-1, а показана часть осевого сечения обмотки, расположенной в масле. Для определения внутреннего перепада температуры в обмотке примем следующие условия: 1) в направлении вертикальной оси обмотка имеет значительный размер, обеспечивающий отсутствие теплоотдачи в этом направлении; 2) обмотка представляет собой однородное тело плоской формы с одинаковой теплопроводностью во всех точках поперечного сечения; 3) с двух сторон обмотка омывается трансформаторным маслом равной температуры; 4) потери в единице объема обмотки неизменны и равны p (Вт/см³).

При соблюдении этих условий наиболее нагретые точки будут располагаться по оси поперечного сечения обмотки (ось Y) и тепловой поток будет направлен от этой оси к правой и левой наружным поверхностям обмотки (в направлении оси X).

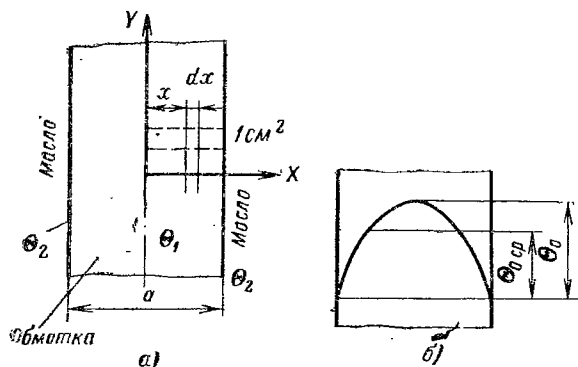


Рис. 9-1. Перепады температуры в обмотке.

a — к определению внутреннего перепада температуры; b — распределение перепада температуры по сечению обмотки.

Рассмотрим трубку теплового потока с сечением 1 см^2 (рис. 9-1, a). Тепловой поток, проходящий через элемент длины этой трубки, будет равен:

$$P = px. \quad (9-1)$$

Перепад температуры на элементе длины dx можно записать так:

$$d\vartheta = \frac{px \, dx}{\lambda}, \quad (9-2)$$

где λ — средняя теплопроводность обмотки.

Интегрируя это уравнение для участка пути теплового потока от $x=0$ до $x=a/2$, получаем:

$$\Theta_1 - \Theta_2 = \frac{p}{\lambda} \int_0^{a/2} x \, dx \text{ и далее } \Theta_1 - \Theta_2 = pa^2/8\lambda.$$

Обозначая внутренний перепад температуры в обмотке через $\Theta_0 = \Theta_1 - \Theta_2$, получаем для этого перепада выражение

$$\Theta_0 = pa^2/8\lambda. \quad (9-3)$$

В практике расчета обычно приходится определять не температуру наиболее нагретых точек, а среднюю температуру всей обмотки. Для квадратичной параболы среднее значение ординаты равно $2/3$ максимального значения и, следовательно, среднее значение внутреннего перепада

$$\Theta_{0.\text{ср}} = \frac{2}{3} \Theta_0 \quad (9-4)$$

(рис. 9-1, б).

В реальной обмотке трансформатора условия, для которых были выведены формулы (9-3) и (9-4), как правило, не соблюдаются полностью. Так, например, для обмоток, соприкасающихся с одной стороны с узким масляным каналом, а с другой — со свободно притекающим маслом (наружная обмотка стержня), наиболее нагретая зона сдвигается от середины сечения обмотки в сторону узкого канала. Температура масла, омывающего все обмотки, не постоянна и повышается при движении вверх в каналах обмотки, что приводит к неравному распределению температуры в осевом направлении обмотки. Экспериментальное исследование этого вопроса показывает, что формулы для практического расчета среднего перепада температуры в обмотках могут базироваться на выведенных соотношениях (9-3) и (9-4).

Зависимость между перепадом температуры на поверхности, т. е. разностью температур поверхности обмотки и омывающего ее масла, и потерями энергии, возникающими в обмотке, определяется экспериментально и приближенно имеет вид:

$$\Theta_{0.\text{м}} = kq^n, \quad (9-5)$$

где $\Theta_{0.\text{м}}$ — разность температур поверхности обмотки и масла;

k — постоянный коэффициент;

q — плотность теплового потока на поверхности обмотки;

$n = 0,5 \div 0,7$ — определяемый экспериментально показатель степени.

Значения k и n в (9-5) зависят от расположения охлаждаемых маслом поверхностей обмотки, размеров масляных каналов и вязкости масла. В практике теплового расчета применяют формулы, выведенные и проверенные экспериментально, для некоторых типичных слу-

чаев расположения и размеров масляных каналов при средней эксплуатационной температуре масла 60—70°C и стандартной его вязкости.

Масло, нагретое у поверхности обмоток трансформатора, поднимается в верхнюю часть его бака, соприкасается со стенками бака и отдавая им часть своего тепла, вновь опускается вниз. При наличии на стенках бака волн, труб или специально пристроенных радиаторов (охладителей) часть масла опускается вниз, омывая их

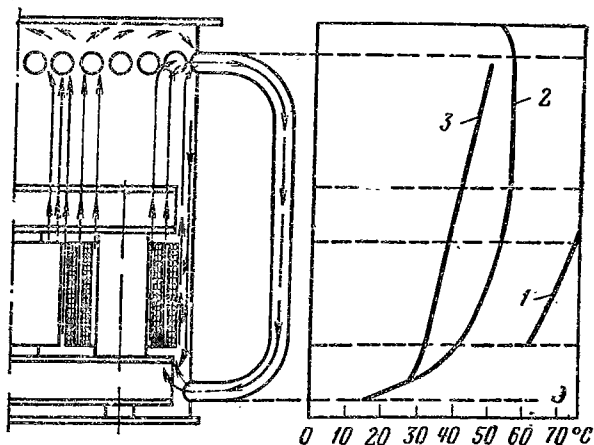


Рис. 9-2. Распределение превышений температуры над воздухом и направление конвекционных токов масла в трансформаторе с трубчатым баком.

1 — обмотка; 2 — масло в баке; 3 — стенка трубы.

внутреннюю поверхность. Охлажденное масло вновь подходит к обмоткам, и конвекционный ток масла внутри бака оказывается замкнутым. Направление конвекционного тока внутри трубчатого бака трансформатора показано на рис. 9-2.

Переход тепла от масла, омывающего изнутри стенку бака (трубы, радиатора), к самой стенке происходит при наличии определенной разности температур между маслом и стенкой. Этот перепад определяется принципиально теми же законами, что и перепад на поверхности обмотки, и может быть в зависимости от плотности теплового потока на поверхности стенки в общем виде выражен (9-5). Температурный перепад на толщине стен-

ки бака или трубы составляет значительно менее 1°C и в расчете им обычно пренебрегают.

Теплоотдача путем излучения с поверхности стенки бака достаточно точно может быть выражена зависимостью

$$q_{\text{и}} = k \sqrt[4]{\Theta_{\text{б.в}}}, \quad (9-6)$$

где $q_{\text{и}}$ — теплоотдача в воздухе путем излучения с единицы поверхности, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$;
 $\Theta_{\text{б.в}}$ — разность температур стенки бака и воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

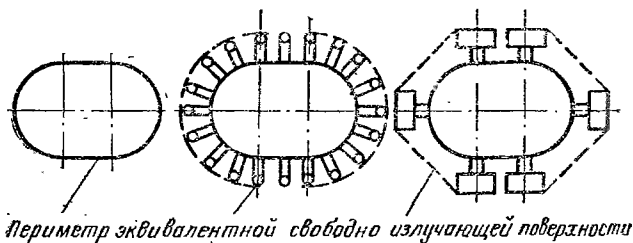


Рис. 9-3. Определение эквивалентной излучающей поверхности для гладкого и трубчатого баков и бака с радиаторами.

Для обычного диапазона разности температур поверхности стенки бака и воздуха $\Theta_{\text{б.в}} = 20 \div 70^{\circ}\text{C}$

$$q_{\text{и}} = 2,8 \sqrt[4]{\Theta_{\text{б.в}}}. \quad (9-7)$$

Вследствие прямолинейного распространения лучистой энергии только с гладкой поверхности можно получить полное излучение, определяемое по (9-6). Излучение с поверхности другой формы, например выгнутой в виде волн, снабженной трубами и т. д., определяется не всей поверхностью, а ее внешним периметром (рис. 9-3). Теплоотдача путем излучения играет существенную роль для гладких баков или баков со слабо разветвленной поверхностью, где она достигает 50% общей теплоотдачи бака. Для баков с широко разветвленной поверхностью, например с тремя-четырьмя рядами охлаждающих труб, или с радиаторами теплоотдача излучением снижается до 10—20% общей теплоотдачи бака. Теплоотдача в воздухе путем конвекции зависит от разности тем-

ператур стенки бака и воздуха, высоты стенки, формы поверхности, барометрического давления и в общем виде может быть выражена формулой

$$\chi \quad q_k = k k_{\phi} \sqrt[4]{\Theta_{б.в.}}, \quad (9-8)$$

где q_k — теплоотдача путем конвекции в воздухе с единицы поверхности, отнесенная к 1°C , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, при разности температур $\Theta_{б.в.}$, $^{\circ}\text{C}$.

Для баков трансформаторов высотой от 2 до 5 м при барометрическом давлении воздуха 0,1 МПа (760 мм рт. ст.) можно принять $k=2,5$. Коэффициент k_{ϕ} учитывает форму поверхности и связанное с этим затруднение или облегчение движения воздуха. Определение значений k_{ϕ} для поверхностей разной формы приведено в § 9-6.

В отличие от излучения теплоотдача конвекцией происходит со всей поверхности бака и в расчет следует принимать полную поверхность гладкой части бака, труб, волн, радиаторов и т. д.

Из приведенного рассмотрения пути теплового потока в масляном трансформаторе следует, что температурное поле в обмотках, магнитной системе и масле трансформатора должно быть достаточно сложным. На рис. 9-2 показано примерное распределение температуры по высоте трансформатора для обмотки, масла и охлаждающих труб. В практике принято вести расчет по средним превышениям температуры обмотки над маслом, масла и стенки бака над воздухом, с определением максимального превышения температуры масла над воздухом. Этот способ расчета дает вполне удовлетворительную для практики точность определения температур в трансформаторе и, помимо простоты, представляет и то практическое удобство, что его результаты всегда могут быть проверены экспериментальным путем (§ 9-3).

При проведении теплового расчета по средней температуре обмоток необходимо гарантировать, чтобы их максимальная температура не достигла значения, грозящего быстрым разрушением изоляции трансформатора. Это достигается правильным выбором плотности тока в обмотках, рациональной разбивкой их на катушки, правильным размещением в них осевых и радиальных каналов и правильным выбором размеров охлаждающих ка-

налов. Рекомендации по этим вопросам, данные в гл. 5, позволяют получить такую обмотку, в которой максимальная температура превышает среднюю не более чем на 5—15°C.

В сухих трансформаторах теплоотдача от внутренних частей — стержни, внутренние обмотки НН, обращенные внутрь поверхности обмоток ВН, происходит только путем конвекции воздуха. С наружных поверхностей обмоток ВН и с открытых поверхностей ярм происходит теплоотдача путем конвекции и излучения. Поэтому на внешних поверхностях наружных обмоток сухих трансформаторов допускаются более высокие значения плотности теплового потока до 600 Вт/м² при разности температуры обмотки и воздуха около 60°C. Поскольку в сухих трансформаторах большая часть охлаждающей поверхности образуется во внутренних каналах обмоток, основная масса тепла отводится в них путем конвекции. При этом приходится также считаться с возможностью перехода тепла с более нагретых внутренних поверхностей на менее нагретые путем излучения.

9-2. КРАТКИЙ ОБЗОР СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Выше было показано, что теплоотдача путем излучения и конвекции с единицы внешней поверхности бака находится в зависимости от превышения температуры поверхности стенки бака $\Theta_{б.в}$ над окружающим воздухом. Поскольку предельные превышения температуры обмоток и масла над воздухом даны в ГОСТ независимо от мощности трансформатора, разность температур $\Theta_{б.в}$, а следовательно, и теплоотдача с единицы поверхности бака для трансформаторов разной мощности будут примерно равными. Для того чтобы с ростом мощности трансформатора сохранить удельную тепловую нагрузку поверхности q и разность $\Theta_{б.в}$ неизменным (§ 3-4), приходится прибегать к искусственному увеличению внешней поверхности бака путем применения стенок, выгнутых в виде волн, или установки охлаждающих труб, или подвески к баку радиаторов. При очень больших мощностях и в некоторых особых случаях применяется форсированное охлаждение путем обдувания охладителей бака вентиляторами, перекачки масла трансформатора через специальные охладители и т. д.

В ГОСТ 11677-75 предусмотрены следующие виды охлаждения трансформаторов и условные обозначения.

Сухие трансформаторы

Естественное воздушное при открытом исполнении — С
Естественное воздушное при защищенном исполнении — СЗ
Естественное воздушное при герметичном исполнении — СГ
Воздушное с дутьем — СД

Естественное масляное — М

Масляное с дутьем и естественной циркуляцией масла — Д

Масляное с дутьем и принудительной циркуляцией масла — ДЦ

Масляно-водяное с естественной циркуляцией масла — МВ

Масляно-водяное с принудительной циркуляцией масла — Ц

Трансформаторы с заполнением негорючим жидким диэлектриком

Естественное охлаждение негорючим жидким диэлектриком — Н

Охлаждение негорючим жидким диэлектриком с дутьем — НД

Трансформаторы с естественным масляным охлаждением только при очень малой мощности, не превышающей 25 кВ·А, могут выпускаться в гладких баках без волн или труб.

Вместе с ростом мощности возникает необходимость в увеличении поверхности охлаждения бака. Хорошим решением этого вопроса является применение трубчатого бака. Стальные трубы диаметром 3—6 см располагаются вертикально, параллельно стенке бака. Конец труб изгибаются и свариваются в верхнюю и нижнюю части стенки. В случае необходимости вокруг бака располагают два-три и, как правило, не более четырех рядов труб. Бак этого типа обеспечивает хорошую теплоотдачу, обладает высокой механической прочностью, прост в производстве. В практике советского трансформаторостроения трубчатый бак применяется для трансформаторов мощностью до 1600 кВ·А включительно, хотя не исключено его применение и при больших мощностях.

Для трансформаторов мощностью свыше 1600 кВ·А применяют гладкие баки с подвешенными к ним радиаторами. Радиаторы выполняются из волнистых пакетов («волн»), сваренных из листов стали толщиной 1—2 мм, или из труб диаметром 3,0—6,0 см. Трубчатые радиаторы значительно прочнее и дешевле в производстве, чем радиаторы, сваренные из волн. В советском трансформаторостроении в настоящее время применяются трубчатые радиаторы (рис. 9-13).

Бак с радиаторами при естественном охлаждении может обеспечить нормальную теплоотдачу для трансформатора мощностью до 10 000—16 000 кВ·А. При больших мощностях периметр гладкого бака оказывается недостаточным для размещения необходимого числа радиаторов. В этом случае выходом из положения является переход от естественного к форсированному охлаждению, которое может осуществляться путем ускорения движения масла или воздуха.

На рис. 9-4 показано форсированное охлаждение бака с радиаторами при помощи обдувания небольшими вентиляторами, установленными на каждом радиаторе. При этом способе можно увеличить теплоотдачу бака на 50—60% по сравнению с теплоотдачей при естественном охлаждении.

Другим способом форсирования охлаждения является усиленная циркуляция масла. Масло из бака трансформатора откачивается насосом, прогоняется через водяной или воздушный теплообменник и охлажденное вновь возвращается в бак трансформатора. Циркуляция охлаждающей среды в теплообменнике — воды или воздуха — также усиливается при помощи насосов или вентиляторов.

В последние годы для трансформаторов большой мощности все более широкое применение находит система циркуляционного воз-

душного охлаждения при помощи малогабаритных охладителей, собираемых из тонкостенных мелких трубок, внутри которых протекает масло, и поперечных металлических пластин. В некоторых конструкциях поперечные пластины заменяются тонкими ребрами, напаянными или накатанными на поверхности трубок по винтовой линии.

Циркуляция масла усиливается насосами, встроенными вместе со своими двигателями в маслопровод, соединяющий бак трансформатора с охладителем. Для усиления циркуляции воздуха применя-

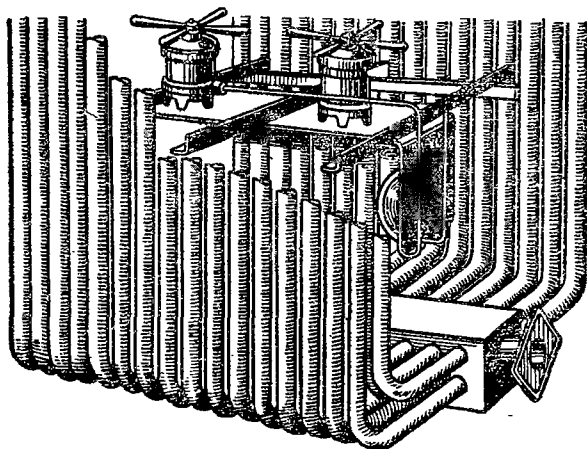


Рис. 9-4. Установка вентиляторов для обдувания радиатора.

ются специальные вентиляторы. Отдельные охладители подобного типа могут отводить до 100—150 кВт потерь при относительно малой массе и габаритах.

Форсированное охлаждение во всех случаях требует постоянной дополнительной затраты энергии на перекачку масла и подачу воздуха или воды, чем снижается общий к. п. д. трансформатора.

Водяное охлаждение, кроме того, требует расхода воды.

Теплопередача в масле внутри трансформатора происходит только путем конвекции, т. е. движущимся маслом. Теплоотдача с наружных поверхностей системы охлаждения в окружающий воздух путем конвекции, т. е. посредством движущегося воздуха, с ростом мощности трансформатора приобретает главное значение. Поэтому для достижения наиболее эффективного охлаждения внутри и вне трансформатора должны быть обеспечены наиболее благоприятные условия для движения масла и воздуха.

Наилучшие условия для движения масла внутри обмоток и теплоотдачи от обмоток к маслу представляют вертикальные каналы (рис. 9-5, а). Сочетание вертикальных и горизонтальных каналов (рис. 9-5, б) несколько ухудшает теплоотдачу, однако широко используется в винтовых и катушечных обмотках. Конструкция чере-

дующейся обмотки, разделенной на отдельные группы шайбами, плотно прилегающими к поверхности изоляционного цилиндра (рис. 9-5, в), является неудачной потому, что в ней затруднен доступ охлаждающего масла к проводам, находящимся вблизи цилиндра. Не менее важное значение имеет свободный доступ и выход

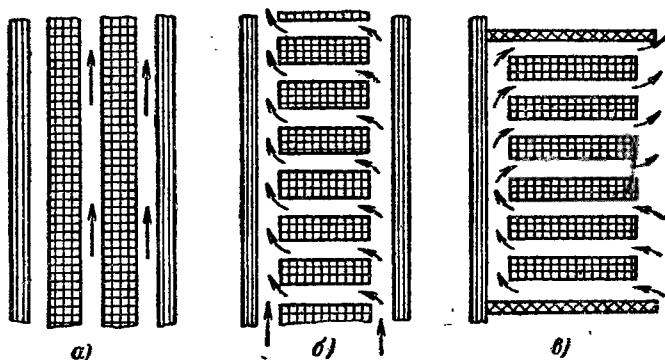


Рис. 9-5. Организация движения масла, охлаждающего обмотки.
а — осевые каналы; б — сочетание осевых и радиальных каналов; в — сочетание осевых каналов с тупиковыми радиальными каналами.

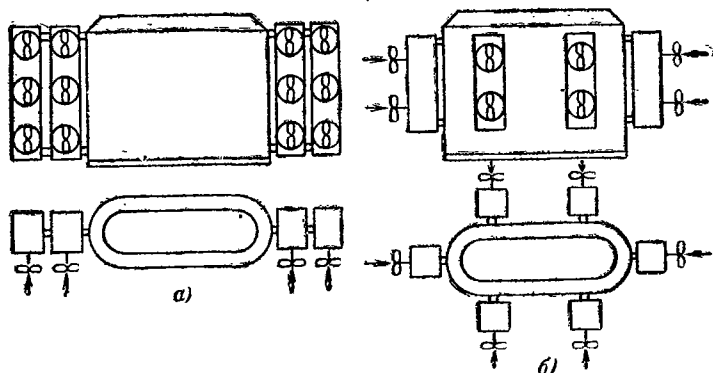


Рис. 9-6. Размещение охладителей на баке.
а — рациональное с свободным входом и выходом воздуха; б — нерациональное — выход воздуха затруднен.

воздуха в частях системы охлаждения — трубах, радиаторах, охладителях. При естественном охлаждении в этих конструкциях необходимо соблюдать достаточные расстояния (шаг) между трубами или волнами, не допускать закрытия входа и выхода воздуха вниз и вверх радиаторов. При охлаждении с принудительным движением масла внутри охладителей следует размещать охладители так, что-

бы на входе и выходе охлаждающего воздуха не было препятствий. В этом смысле более удачным является размещение охладителей по рис. 9-6,а по сравнению с рис. 9-6,б. При циркуляционном охлаждении предпочтительным является направленное движение масла внутри бака, когда масло из охладителей при помощи специальных перегородок направляется непосредственно в охлаждающие каналы обмоток и магнитной системы.

9.3. НОРМЫ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПРЕВЫШЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

В тепловом отношении трансформатор должен быть рассчитан так, чтобы превышения температуры его обмоток, магнитной системы и масла над окружающим воздухом или охлаждающей водой (для форсированного водяного охлаждения) при номинальной нагрузке не превосходили значений допускаемых ГОСТ 11677-75. Нормы этого ГОСТ установлены с таким расчетом, чтобы предельная средняя температура обмоток в наиболее жаркое время года не превосходила 105—110°C при среднегодовой температуре около 75°C. При соблюдении этих условий изоляции трансформатора не подвергается ускоренному старению и может надежно работать в течение 20—25 лет. Нагрев масляных силовых трансформаторов ограничивается согласно § 3 ГОСТ 11677-75 следующими превышениями температуры частей трансформатора сверх температуры охлаждающей среды при сколь угодно длительно поддерживаемых во время испытания нормированных потерях холостого хода и потерях короткого замыкания, приведенных к 75°C.

Масляные трансформаторы

Обмотки 65°C

Поверхности магнитопровода и конструктивных элементов 75°C.

Масло в верхних слоях:

исполнение трансформатора герметичное или с устройством, полностью защищающим масло от соприкосновения с окружающим воздухом 60°C, в остальных случаях 55°C.

Сухие трансформаторы

Обмотки — при классах нагревостойкости по ГОСТ 8865-70: 1

класс А 60°C; класс Е 75°C; класс В 80°C.

класс F 100°C; класс H 125°C.

Нагрев поверхности магнитопровода и конструктивных деталей ограничивается допустимыми превышениями температуры соприкасающихся с ними изоляционных материалов.

Для измерения температуры частей трансформатора установлены следующие методы: измерение температуры обмоток — по изменению сопротивления; измерение температуры других частей и масла — по термометру. Установлены также следующие предельные температуры охлаждающей среды: для воды — не более +25°C у входа в охладитель; для воздуха — естественно изменяющаяся температура не выше +40°C и не ниже -45°C; среднесуточная температура не выше +30°C и среднегодовая температура не выше +20°C.

Технические условия ГОСТ 11677-75 базируются на принятых в практике реальных методах измерения температуры обмоток и

масла трансформатора. Поэтому в нормах не регламентирована максимальная температура обмоток или средняя температура масла, измерение которых возможно далеко не при любых напряжениях обмоток трансформатора и только в лабораторных условиях. В современных трансформаторах при правильном выборе плотности тока в обмотках и рациональном распределении охлаждающих каналов проверка нагрева обмоток по средней их температуре обеспечивает также не слишком высокую максимальную температуру отдельных точек обмотки.

9.4. ПОРЯДОК ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРА

Тепловой расчет трансформатора проводится после завершения электромагнитного и механического расчетов его обмоток и магнитной системы. При правильном выборе электромагнитных нагрузок и правильном распределении и выборе размеров охлаждающих масляных каналов внутренние температуры в обмотках и магнитной системе оказываются не выше обычно допускаемых значений. Вследствие этого тепловой расчет обмоток сводится к поверочному определению перепадов температуры внутри них и на поверхности для принятой конструкции и размеров обмотки. Определение этих перепадов проводится по (9-3) и (9-5) с учетом конструктивных особенностей обмоток различных типов (см. § 9 5).

Тепловой расчет бака отличается тем, что сама конструкция бака зависит в первую очередь от того теплового потока, который должен быть отведен с поверхности бака в окружающий воздух, и лишь во вторую очередь определяется требованиями механической прочности. Поэтому при тепловом расчете бака сначала рассчитывается допустимое среднее превышение температуры стенки бака над окружающим воздухом, затем по требуемой теплоотдаче приближенно определяется его охлаждаемая поверхность, затем подбираются размеры и число конструктивных элементов, образующих эти поверхности, — гладких стенок, труб, волн, охладителей — и, наконец, производится поверочный расчет превышения температуры стенки бака и масла над окружающим воздухом. При получении превышений температуры, отличающихся от допустимых, производится корректировка охлаждающей поверхности путем увеличения или уменьшения числа или размеров конструктивных элементов — труб, охладителей и т. д. После завершения теплового расчета бака производится проверка его конструкции на механическую прочность.

9-5. ПОВЕРОЧНЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ОБМОТОК

Подсчет внутреннего перепада температуры в большинстве обмоток из прямоугольного провода упрощается тем обстоятельством, что каждый провод, как правило,

одной или двумя сторонами своего сечения соприкасается с маслом (рис. 9-7). Внутренний перепад температуры в этом случае является перепадом в изоляции одного провода и определяется по (9-9) как элементарный перепад для теплового потока постоянной величины

$$\Theta_0 = \frac{q\delta}{\lambda_{из}} 10^{-4}, \quad (9-9)$$

где q — плотность теплового потока на поверхности обмотки, определяемая согласно указаниям § 6-1, 6-3 и 7-1, Вт/м²;

δ — толщина изоляции провода на одну сторону по рис. 9-7, см;

λ — теплопроводность изоляции провода определяемая для различных материалов по табл. 9-1, Вт/(см·°С).

При подсчете внутреннего перепада в катушках с общей изоляцией всей катушки (входные катушки обмотки) по (9-9) значение δ следует определять как суммар-

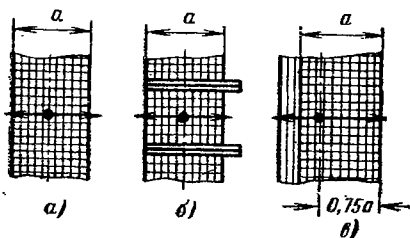


Рис. 9-8. К расчету внутреннего перепада в многослойных обмотках из круглого и прямоугольного провода.

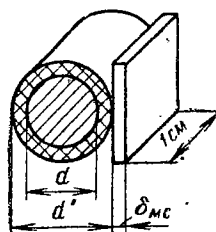


Рис. 9-9. Элемент объема обмотки — провод и междуслойная изоляция.

дную толщину изоляции провода и общей изоляции катушки на одну сторону.

Полный внутренний перепад температуры в обмотках из круглого провода, не имеющих горизонтальных охлаждающих каналов (рис. 9-8, а, б),

$$\Theta_0 = \frac{pa^2}{8\lambda_{\text{ср}}}, \quad (9-10)$$

где a — радиальный размер катушки по рис. 9-8, см; при наличии в обмотке осевого охлаждающего канала по рис. 5-26, в, г или d размер a следует определять как ширину — радиальный размер наиболее широкой из двух катушек, на которые разделена обмотка (на рис. 5-26, г и д правой катушки);

p — потери, выделяющиеся в 1 см³ общего объема обмотки.

Для медного провода p , Вт/см³, определяется по формуле в соответствии с рис. 9-9:

$$p_{\text{м}} = \frac{2,4\Delta^2 \pi d^2 \cdot 1 \cdot 8900 \cdot 10^{-6}}{4(d' + \delta_{\text{мс}}) d' \cdot 1} = 1,68 \frac{\Delta^2 d^2}{(d' + \delta_{\text{мс}}) d'} 10^{-2}, \quad (9-11)$$

где d , $d'\delta_{\text{мс}}$ — в см; Δ — в А/мм².

Для алюминиевого провода

$$p_{\text{А}} = 2,71 \frac{\Delta^2 d^2}{(d' + \delta_{\text{мс}}) d'} 10^{-2}. \quad (9-11')$$

Средняя теплопроводность обмотки $\lambda_{\text{ср}}$, Вт/(см·°С), приведенная к условному случаю равномерного распределения витковой и междуслойной изоляции по всему объему обмотки, определяется по формуле

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\lambda_{\text{мс}}(d' + \delta_{\text{мс}})}{\lambda\delta_{\text{мс}} + \lambda_{\text{мс}}d'}. \quad (9-12)$$

Теплопроводность междуслойной изоляции $\lambda_{\text{мс}}$ находится по табл. 9-1. Средняя условная теплопроводность обмотки λ без учета междуслойной изоляции

$$\lambda = \lambda_{\text{из}}/0,7\sqrt{\alpha}, \quad (9-13)$$

где $\alpha = (d' - d)/d$;

$\lambda_{\text{из}}$ — теплопроводность материала изоляции витков, определяемая по табл. 9-1.

Удельные теплопроводности различных изоляционных материалов

Материал	λ из, Вт/(см·°С)
Хлопчатобумажная лента лакированная	0,0027
Бакелизованная полотняная лента	0,0027
Лакоткани	0,0025
Бумага сухая	0,0012
Бумага промасленная	0,0014
Бумага лакированная (пропитанная лаком)	0,0017
Электроизоляционный картон . . .	0,0017
Картон лакированный	0,0014

В случае, если обмотка намотана непосредственно на изоляционном цилиндре (рис. 9-8, в) и имеет только одну открытую поверхность охлаждения, наиболее нагретая зона сдвигается от центра сечения обмотки в сторону цилиндра примерно до 0,75 a от наружной поверхности.

Полный внутренний перепад, °С,

$$\Theta_0 = \frac{p (0,75a)^2}{2\lambda_{\text{ср}}} = 0,28 \frac{pa^2}{\lambda_{\text{ср}}}, \quad (9-14)$$

где $\lambda_{\text{ср}}$ определяется по (9-12);

a — радиальный размер катушки, см.

В катушечной обмотке из круглого провода с каналами между катушками (рис. 5-28) теплоотдача происходит в направлениях осевом (ось Y) и радиальном (ось X). Определение внутреннего перепада температуры для этой обмотки, °С, если осевой размер катушки h_k , а радиальный l_p , может быть произведено по формуле

$$\Theta_0 = \frac{pa^2}{8 \left(\lambda_x + \lambda_y \frac{l_p^2}{h_k^2} \right)}. \quad (9-15)$$

Для определения теплопроводности в направлениях осей X и Y можно воспользоваться формулами: для λ_x — формулой (9-12), для λ_y — формулой (9-13). Формулы

(9-10), (9-14) и (9-15) определяют перепад температур от наиболее нагретой точки обмотки из круглого провода до ее поверхности. В то же время нормами регламентируется среднее превышение температуры обмотки, а следовательно, и внутренний перепад температуры. Средний перепад температуры по (9-4) составляет $\frac{2}{3}$ полного перепада

$$\Theta_{0, \text{ср}} = \frac{2}{3} \Theta_0.$$

Внутренний перепад в многослойных обмотках из провода прямоугольного сечения подсчитывается по такой же методике по формулам (9-10), (9-14), (9-15) и (9-4) с заменой формул (9-11), (9-11'), (9-12) и (9-13) на следующие:

$$p_M = \frac{2,14 \Delta^2 ab}{(a' + \delta_{\text{мс}}) b'} 10^{-2}; \quad (9-16)$$

$$p_A = \frac{3,44 \Delta^2 ab}{(a' + \delta_{\text{мс}}) b'} 10^{-2}; \quad (9-16')$$

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\lambda_{\text{мс}} (a' + \delta_{\text{мс}})}{\lambda \delta_{\text{мс}} + \lambda_{\text{мс}} a'}; \quad (9-17)$$

$$\lambda = \lambda_{\text{из}} \frac{ba'}{2\delta b'}, \quad (9-18)$$

где a и a' — размеры провода в направлении движения тепла без изоляции и в изоляции, см;

b и b' — то же в направлении, перпендикулярном движению тепла, см;

2δ — толщина изоляции провода, см. (на две стороны).

В (9-15) для определения λ_x следует пользоваться (9-17) и (9-18), а для определения λ_y — формулой (9-18) с заменой b на a , a' на b' и b' на a' .

Перепад температуры на поверхности обмотки является функцией плотности теплового потока q (Вт/м²), на поверхности обмотки, которая подсчитывается как частное от деления потерь, возникающих в обмотке, на открытую охлаждаемую маслом поверхность. Подсчет q производится согласно указаниям, данным в § 6-1, 6-3 и 7-1. Формулы, применяемые в практике расчета для

определения перепада температуры на поверхности обмотки, получены эмпирически и могут применяться только в тех случаях, для которых они проверены опытом.

Для цилиндрических обмоток из прямоугольного или круглого провода, или из алюминиевой фольги (см. § 5-3 и 5-4), а также для винтовых обмоток, не имеющих радиальных (горизонтальных) каналов (см. § 5-5), перепад на поверхности обмотки масляного трансформатора, °С,

$$\Theta_{o.m} = kq^{0,6}, \quad (9-19)$$

где $k=0,285$.

Формула (9-19) справедлива при осевых (вертикальных) каналах в обмотке шириной не менее, чем указано в табл. 9-2а—9-2в.

Таблица 9-2а

Минимальная ширина охлаждающих каналов в обмотках, см.
Масляные трансформаторы

Вертикальные каналы				Горизонтальные каналы	
Длина канала, см	Обмотка—обмотка	Обмотка—цилиндр	Обмотка—стержень	Длина канала, см	Обмотка—обмотка
До 30	0,4—0,5	0,4	0,4—0,5	До 4,0	0,4
30—50	0,5—0,6	0,5	0,5—0,6	4—6,0	0,5
50—100	0,6—0,8	0,5—0,6	0,6—0,8	6—7,0	0,6
100—150	0,8—1,0	0,6—0,8	0,8—1,0	7—8,0	0,7

Таблица 9-2б

Сухие трансформаторы, вертикальные каналы. Выбор ширины канала по допустимому превышению температуры и плотности теплового потока на поверхности обмотки q , Вт/м²

Класс изоляции	Допустимое превышение температуры, °С	Плотность теплового потока, Вт/м ² , при ширине канала		
		0,7 см	1,0 см	1,5 см
А	60	160	300	380
Е—В	75—80	230	450	550
Ф	100	300	600	720
Н	125	380	800	950

Сухие трансформаторы, горизонтальные каналы. Выбор ширины канала по допустимому превышению температуры и плотности теплового потока на поверхности обмотки q , Вт/м²

Класс изоляции	Допустимое превышение температуры, °С	Плотность теплового потока, Вт/м ² , при ширине канала		
		0,8 см	1,2 см	1,6 см
А	60	280	380	450
Е—В	75—80	320	420	540
F	100	420	540	720
Н	125	580	720	1000

В сухих трансформаторах для изоляции различных классов нагревостойкости допускаются различные превышения температуры обмоток над температурой охлаждающего воздуха. Размеры вертикальных и горизонтальных охлаждающих каналов для трансформаторов могут быть выбраны в зависимости от класса изоляции и плотности теплового потока на поверхности обмотки по табл. 9-2б и 9-2в.

При соблюдении этих размеров каналов и допустимых плотностей теплового потока на поверхности обмоток сухих трансформаторов превышение температуры обмоток этих трансформаторов над воздухом, как правило, не превосходит нормированного значения и необходимость их специального теплового расчета отпадает.

При определении перепада температуры на поверхности обмоток из прямоугольного или круглого провода с горизонтальными каналами необходимо учитывать способ охлаждения трансформатора, расположение обмотки и размеры горизонтальных масляных каналов (рис. 9-10). Перепад на поверхности обмотки масляного трансформатора может быть подсчитан по эмпирической формуле

$$\Theta_{o.m} = k_1 k_2 k_3 \cdot 0,35 q^{0,6} . \quad (9-20)$$

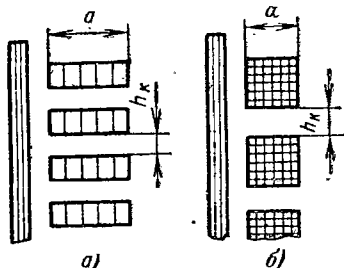


Рис. 9-10. К определению перепада температуры по формуле (9-20).

Коэффициент k_1 учитывает скорость движения масла внутри обмотки, зависящую от системы охлаждения:

Для естественного масляного охлаждения . $k_1=1,0$

Для масляного охлаждения с дутьем . . . $k_1=0,9$

Для масляного охлаждения с принудительной циркуляцией масла $k_1=0,7$

Коэффициент k_2 учитывает затруднение конвекции масла в каналах внутренних обмоток НН и СН и может быть принят:

$k_2=1,0$ для наружных обмоток ВН;

$k_2=1,1$ для внутренних обмоток НН и СН.

Коэффициент k_3 учитывает влияние на конвекцию масла относительной ширины (высоты) горизонтальных масляных каналов и может быть взят по табл. 9-3 в зависимости от отношения высоты к глубине канала (ширина обмотки).

Таблица 9-3

Значения коэффициента k_3 в (9-20)

h_K/a	0,07— 0,08	0,08— 0,09	0,1	0,11— 0,12	0,13— 0,14	0,15— 0,19	0,2 и более
k_3	1,1	1,05	1,0	0,95	0,90	0,85	0,8

После определения внутреннего и внешнего перепадов температуры в обмотках для каждой из обмоток подсчитывается среднее превышение ее температуры над средней температурой масла

$$\Theta_{o.m.ap} = \Theta_{o.cp} + \Theta_{o.m.} \quad (9-21)$$

9-6. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ БАКА

При выборе конструкции бака для трансформатора главное внимание следует обращать на хорошую теплоотдачу, механическую прочность, простоту в изготовлении и по возможности меньший внешний габарит. Применяемые в советском трансформаторостроении баки с гладкими стенками, баки с трубами и баки с трубчатыми радиаторами отвечают всем этим требованиям.

Типы баков трансформаторов

Тип бака	Вид охлаждения	Пределы применения по мощности, кВ·А
Бак с гладкими стенками	М	До 25—40
Бак с трубами	М	От 40 до 6300
Бак с радиаторами из труб	М	От 1600 до 10 000
Бак с радиаторами из труб с дутьем	Д	От 10 000 до 63 000

Ввиду того что потери в трансформаторе связаны с его мощностью, при выборе конструкции бака можно ориентироваться по мощности трансформатора (табл. 9-4).

После выбора типа бака следует определить его минимальные внутренние размеры. При заданных размерах активной части трансформатора, т. е. его остова с обмотками и отводами, минимальные внутренние размеры бака в плане определяются внешними габаритами активной части и минимально необходимыми изоляционными расстояниями от обмоток и отводов до стенок бака.

Определение изоляционных промежутков от отводов до обмотки ВН и до стенки бака следует производить в соответствии с указаниями, данными в гл. 4 (табл. 4-11 и 4-12), учитывая производственные допуски в размерах частей трансформатора и толщину отвода.

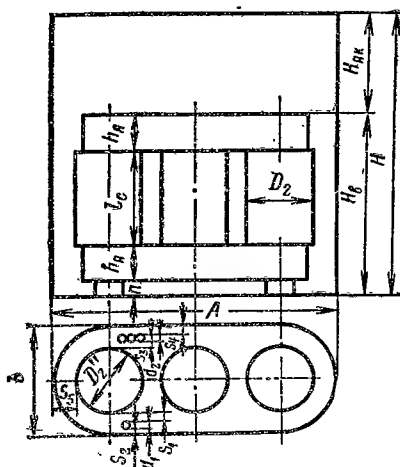


Рис. 9-11. К определению основных размеров бака.

Определение этих расстояний производится отдельно для отводов стороны ВН и НН. Минимальные внутренние размеры бака определяются согласно рис. 9-11.

Минимальная длина бака трехфазного трансформатора классов напряжения 6; 10 и 35 кВ

$$A = 2C + D_2'' + 2s_5. \quad (9-22)$$

Расстояние s_5 при испытательных напряжениях до 85 кВ может быть принято таким же, как и расстояние от неизолированного отвода до обмотки, и определено по табл. 4-12. В некоторых случаях расстояние s_5 принимают равным суммарному расстоянию от бака $s_3 + d_2 + s_4$.

Минимальная ширина

$$B = D_2'' + s_1 + s_2 + d_1 + s_3 + s_4 + d_2. \quad (9-23)$$

Для трансформаторов с классом напряжения обмотки ВН 110 кВ при расположении вводов ВН в масле между ярмом и стенкой бака размеры бака в плане A и B могут быть приближенно приняты:

$$\text{трехфазные } A \approx 2C + D_2'' + 80 \text{ см};$$

$$\text{однофазные } A \approx C + D_2'' + 80 \text{ см};$$

$$B = d_2'' + 80 \text{ см (в обоих случаях).}$$

Внутренние размеры бака, найденные по (9-22) и (9-23), обычно оказываются достаточными и по соображениям теплоотдачи.

Глубина бака определяется высотой активной части и минимальным расстоянием от верхнего ярма до крышки бака, обеспечивающим размещение внутренних частей проходных изоляторов, отводов и переключателей, если переключатели крепятся под крышкой бака.

Высота активной части может быть определена по формуле

$$H_{a.ч} = l_c + 2h_{я} + n, \quad (9-24)$$

где n — толщина подкладки под нижнее ярмо ($n = 3 \div 5$ см).

Выбор расстояний от верхнего ярма трансформатора до крышки бака $H_{я.к}$ может быть сделан по табл. 9-5 по классу напряжения (рабочему напряжению) обмотки

Минимальное расстояние от ярма до крышки бака

Класс напряжения обмотки ВН, кВ	Минимальное расстояние от ярма до крышки, см	Класс напряжения обмотки ВН, кВ	Минимальное расстояние от ярма до крышки, см
6	27,0	35*	47,0*
10	30,0	110**	50,0**
20	30,0		

* Для трансформаторов от 1600 кВ·А и выше в случае применения трехфазного переключателя, прикрепленного к крышке бака, расстояние $H_{я.к} \approx 85$ см.

** При классе напряжения 110 кВ вводы ВН в масле располагаются между ярмом и стенкой бака; расстояние $H_{я.к} \approx 50$ см независимо от ΣP .

ВН. Расстояние, найденное по табл. 9-5, является минимальным и обычно оказывается достаточным для получения необходимой теплоотдачи бака для трансформаторов с полными потерями ΣP по ГОСТ.

Общая глубина бака

$$H = H_{a.ч} + H_{я.к}. \quad (9-25)$$

Внешняя поверхность стенок бака, труб, волн, охладителей имеет среднее превышение температуры над окружающим воздухом, обозначенное выше $\Theta_{б.в}$. Оно определяется для данного бака тепловым потоком, отводимым с его охлаждаемой поверхности.

Теплоотдача путем излучения со всей поверхности бака, Вт, может быть выражена в виде

$$Q_{из} = q_{из} \Theta_{б.в} \Pi_{из}, \quad (9-26)$$

где $q_{из}$ — удельная теплоотдача путем излучения с единицы излучающей поверхности $\Pi_{из}$ при разности температур стенки бака и воздуха, равный 1°C ;

$\Pi_{из}$ — поверхность излучения бака, определяемая как внешняя обтягивающая поверхность согласно рис. 9-3.

Теплоотдача с поверхности бака путем конвекции

$$Q_{к} = q_{к} \Theta_{б.в} \Pi_{к}. \quad (9-27)$$

где q_k — удельная теплоотдача путем конвекции с единицы поверхности конвекции Π_k при разности температур в 1°C ;

Π_k — поверхность конвекции бака, т. е. полная развернутая суммарная поверхность его гладкой части, труб, волн, охладителей

$$\Pi_k = k_{\phi 1} \Pi_1 + k_{\phi 2} \Pi_2 + \dots + k_{\phi n} \Pi_n; \quad (9-28)$$

здесь $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$ — действительные геометрические поверхности отдельных частей бака;

$k_{\phi 1}, k_{\phi 2}, \dots, k_{\phi n}$ — коэффициенты, учитывающие улучшение или ухудшение теплоотдачи путем конвекции для данной формы поверхности по сравнению с вертикальной гладкой стенкой.

Эти коэффициенты зависят от формы поверхности конвекции (гладкая стенка, труба, волна и т. д.) и размеров ее элементов (диаметр трубы, расстояние между трубами, глубина и ширина воздушного канала волны). Значения коэффициентов для поверхностей разной формы, найденные опытным путем, приведены ниже.

Полная теплоотдача бака Q должна быть равна полным потерям трансформатора:

$$Q = Q_n + Q_k = \Theta_{б.в} (q_n \Pi_n + q_k \Pi_k),$$

или

$$\Theta_{б.в} (q_n \Pi_n + q_k \Pi_k) = 1,05 \Sigma P, \quad (9-29)$$

где ΣP — суммарные расчетные потери трансформатора.

Коэффициент 1,05 учитывает возможное отклонение действительных потерь в трансформаторе от расчетных и применяется при индивидуальном расчете трансформатора. В этом случае следует в выражение (9-29) подставлять ΣP — сумму расчетных потерь короткого замыкания и холостого хода. При расчете серий трансформаторов под ΣP следует понимать сумму гарантийных потерь короткого замыкания и холостого хода и принимать коэффициент 1,1, учитывая возможность отклонения действительных потерь от гарантийных на $\pm 10\%$.

Подставляя в выражение (9-29) значения удельной теплоотдачи q_n и q_k из (9-7) и (9-8) и относя коэффи-

циент, учитывающий форму поверхности k_{ϕ} в (9-8), к поверхности Π_k (9-28), получаем:

$$1,05 \Sigma P = \Theta_{б.в} (2,8 \sqrt[4]{\Theta_{б.в}} \Pi_n + 2,5 \sqrt[4]{\Theta_{б.в}} \Pi_k) = 2,5 \Theta_{б.в}^{1,25} (1,12 \Pi_n + \Pi_k),$$

откуда

$$\Pi_k = \frac{1,05 \Sigma P}{2,5 \Theta_{б.в}^{1,25}} - 1,12 \Pi_n \quad (9-30)$$

и

$$\Theta_{б.в} = \left[\frac{1,05 \Sigma P}{2,8 \Pi_n + 2,5 \Pi_k} \right]^{0,8}. \quad (9-31)$$

Эти выражения положены в основу излагаемого метода теплового расчета бака трансформатора и позволяют приближенно определить размеры бака в предварительном расчете (9-30) и найти его среднее превышение температуры после выяснения всех размеров (9-31).

Потери трансформатора ΣP при тепловом расчете бака задаются. Среднее превышение температуры стенки бака над воздухом $\Theta_{б.в}$ также может быть приближенно определено, исходя из среднего допустимого превышения температуры обмоток над средней температурой масла. После выбора минимальных внутренних размеров бака с достаточной точностью можно определить действительную излучающую поверхность бака Π_n . После этого по (9-30) можно при предварительном тепловом расчете бака приближенно определить необходимую поверхность конвекции Π_k и затем подобрать нужное количество и размеры элементов конструкции бака (труб, волн, радиаторов), обеспечивающих требуемую теплоотдачу.

После окончательного установления основных размеров всех элементов бака, а следовательно, и поверхностей излучения Π_n и конвекции Π_k , пользуясь (9-31), можно определить для данного бака и заданных потерь ΣP среднее превышение температуры стенки бака над окружающим воздухом.

Среднее превышение температуры стенки бака над окружающим воздухом $\Theta_{б.в}$ в предварительном расчете бака должно быть выбрано таким, чтобы средние пре-

вышения температуры обмоток и максимальное превышение температуры масла над воздухом не превосходили значений, допускаемых ГОСТ.

Длительно допустимое среднее превышение температуры обмоток над воздухом при номинальной нагрузке может быть принято равным 65°C. Тогда среднее превышение температуры масла, омывающего обмотки, должно быть не более

$$\Theta_{\text{м.в}} = 65 - \Theta_{\text{о.м.ср.}} \quad (9-32)$$

В этой формуле следует взять большее из двух значений $\Theta_{\text{о.м.ср.}}$ подсчитанных для обмоток ВН и НН.

Среднее превышение температуры стенки бака над воздухом будет меньше $\Theta_{\text{м.в}}$ на перепад температуры между маслом и стенкой бака:

$$\Theta_{\text{б.в}} = \Theta_{\text{м.в}} - \Theta_{\text{м.б.}} \quad (9-33)$$

Обычно $\Theta_{\text{м.б.}}$ не превышает 5—6°C.

Полученное значение $\Theta_{\text{б.в}}$ должно удовлетворять неравенству

$$\sigma (\Theta_{\text{б.в}} + \Theta_{\text{м.б.}}) \leq 55^\circ\text{C}, \quad (9-34)$$

вытекающему из требования ГОСТ, чтобы превышение температуры верхних слоев масла над воздухом не превосходило 55°C (для герметичных трансформаторов 60°C).

Коэффициент σ , определяющий отношение максимального и среднего превышений температуры масла, в предварительном расчете можно принять равным 1, 2. В случае, если значение, полученное из (9-32) и (9-33), не удовлетворяет неравенству (9-34), следует принять: $(\Theta_{\text{б.в}} + \Theta_{\text{м.б.}}) \cdot 1,2 = 55$ и значение $\Theta_{\text{б.в}}$ определить по выражению

$$\Theta_{\text{б.в}} = 45,5 - \Theta_{\text{м.б.}}$$

Поверхность излучения бака в предварительном расчете может быть приближенно определена:

бак прямоугольного сечения в плане

$$P_{\text{н}} = 2(A + B) H k \cdot 10^{-4}; \quad (9-35)$$

бак овального сечения в плане

$$P_{\text{н}} = [2(A - B) + \pi B] H k \cdot 10^{-4}, \quad (9-35')$$

где A, B, H — размеры бака по рис. 9-11, см;

k — коэффициент, учитывающий отношение периметра поверхности излучения к поверхности гладкой части бака и приближенно равный: 1,0—для гладкого бака; 1,2—1,5—для бака с трубами и 1,5—2,0—для бака с навесными радиаторами.

После предварительного приближенного расчета поверхности излучения бака можно по (9-30) также приближенно рассчитать поверхность конвекции бака, требующуюся для получения найденного выше значения $\Theta_{б.в.}$

Найденное таким образом значение поверхности конвекции является ориентировочным, позволяющим найти число и размеры конструктивных элементов бака. Число и размеры труб, волн, радиаторов и гладких стенок бака должны быть подобраны так, чтобы с учетом коэффициентов $k_{ф1}, k_{ф2} \dots$ они в сумме давали полученное выше ориентировочное значение поверхности конвекции Π_k (9-28).

Методика подсчета поверхности конвекции для баков разных типов дана ниже.

Значения коэффициентов $k_{ф1}, k_{ф2} \dots$ для поверхностей различной формы приведены в табл. 9-6.

При определении действительных значений поверхностей излучения и конвекции для спроектированного

Таблица 9-6

Значения коэффициентов k_f в (9-28)

Форма по- верхности	Без дутья				С дутьем по рис. 9-4		
	Гладкая стенка	Трубы				Гладкая стенка	Трубы
		в один ряд	в два ряда	в три ряда	в четыре ряда		
k_{ϕ}	1,0	1,4	$1,4 \cdot 0,96 = 1,344$	$1,4 \cdot 0,93 = 1,302$	$1,4 \cdot 0,9 = 1,26$	$1,0 \cdot 1,6 = 1,6$	$1,4 \cdot 1,6 = 2,24$

Примечания: 1. Коэффициенты даны для труб с наружным диаметром 5,0 см и овальных с размерами поперечного сечения 2,0×7,2 см.

2. Для труб с диаметром около 3 см данные таблицы умножить на 1,15.

3. Для труб радиаторов по рис. 9-13 без дутья круглых с диаметром $\approx 5,0$ см и овальных с размерами 7,2×2,0 см $k_{ср} = 1,4$; для труб с диаметром около 3,0 см $k_{ср} = 1,4 \cdot 1,15 = 1,61$.

4. Для прямых круглых и овальных труб радиаторов по рис. 9-14 $k_{ср} = 1,26$.

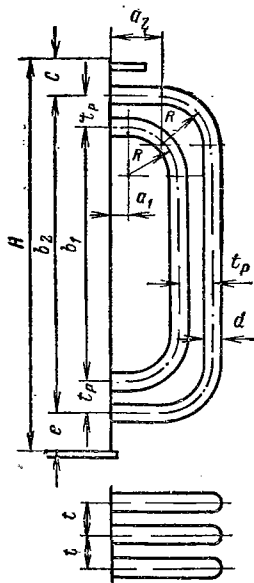


Рис. 9-12. Элементы трубчатого бака.

бака может оказаться, что эти поверхности малы и не обеспечивают должной теплоотдачи. В этом случае рекомендуется увеличить поверхность бака предпочтительно за счет некоторого увеличения его высоты, а не размеров в плане. При том и другом способах увеличения линейных размеров поверхность возрастает прямо пропорционально увеличению линейных размеров, а объем масла в баке растет в первом случае пропорционально первой степени, а во втором — пропорционально второй степени увеличения размеров в плане.

Гладкий бак. Для гладкого бака поверхность излучения $\Pi_{\text{и}}$, равная его внешней поверхности, равна также поверхности конвекции $\Pi_{\text{к}}$.

Поверхность теплоотдачи:
прямоугольного бака

$$\Pi_{\text{и}} = \Pi_{\text{к}} = 2(A + B)H \cdot 10^{-4} + \Pi_{\text{кр}} \cdot 0,5; \quad (9-36)$$

овального бака

$$\Pi_{\text{и}} = \Pi_{\text{к}} = [2(A - B) + \pi B]H \cdot 10^{-4} + \Pi_{\text{кр}} \cdot 0,5, \quad (9-36')$$

где A, B, H — размеры бака по рис. 9-11, см;

$\Pi_{\text{кр}}$ — поверхность крышки бака;

0,5 — коэффициент для поверхности крышки, учитывающий закрытие части поверхности крышки изоляторами вводов ВН и НН и различной арматурой.

Трубчатый бак. Трубчатый бак является одним из наиболее распространенных типов баков (рис. 9-12). Число рядов труб выбирается обычно от одного до четырех в зависимости от необходимой по расчету поверхности конвекции $\Pi_{\text{к}}$. Увеличение числа рядов труб свыше четырех значительно ухудшает теплоотдачу внутреннего ряда труб. Соседние трубы разных рядов располага-

ются одна над другой. Расположение труб в шахматном порядке менее выгодно, так как при этом затрудняется движение воздуха и уменьшается теплоотдача. На рис. 9-12 показана одна из конструкций стенки трубчатого бака. Все трубы имеют радиус изгиба R . Трубы могут быть круглого сечения или овального. Шаги труб в рядах t_t и между рядами t_p могут быть различными. Применение овальных труб позволяет разместить в ряду большее число труб и обеспечить нормальную теплоотдачу бака при одном-двух рядах труб там, где трубы круглого сечения приходится располагать в два-три ряда. В нормальных сериях трансформаторов в СССР применяются трубы круглого сечения $\varnothing 5,1/4,8$ см с толщиной стенки 0,15 см и овальные трубы с размерами поперечного сечения $7,2 \times 2,0$ см при толщине стенки 0,15 см. Сравнительные данные тех и других труб приведены в табл. 9-7. Эта же таблица позволяет выбрать число рядов труб для трансформаторов различных мощностей.

Таблица 9-7

Данные круглых и овальных труб, применяемых
в нормальных сериях трансформаторов

Форма трубы	Размеры сечения, см	Толщина стенки, см	Поперечное сечение в свету, см ²	Поверхность 1 м, м ²	Масса в 1 м, кг	
					Металл	Масло в трубе
Круглая	$\varnothing 5,1$	0,15	18,1	0,16	1,82	1,63
Овальная	$7,2 \times 2,0$	0,15	8,9	0,16	1,82	0,79
Круглая	$\varnothing 3,0$	0,12	6,0	0,0942	0,845	0,54

Форма трубы	Шаг, см		Радиус изгиба R , см	Число рядов труб при мощности, кВт·А		
	между рядами t_p	в ряду t_t		63—160	250—630	1000—1600
Круглая	7,5	7,0	15	1	2	2—3
Овальная	10,0	5,0	18,8	1	1	1—2
Круглая	5,5	5,0	15,0	1	1	2—3

В последнее время трубы диаметром 5,1 см иногда заменяются трубами диаметром 3,0 см и толщиной стенки 0,1—0,15 см. Такая замена позволяет уменьшить массу

труб и масла в них и одновременно примерно на 15% увеличить теплоотдачу с единицы поверхности трубы.

По (9-25) можно приближенно определить глубину бака трансформатора от дна до крышки H . Расстояние между центрами отверстий наружного ряда труб b (b_2 на рис. 9-12) должно быть меньше H на сумму расстояний c и e . Эти расстояния зависят от конструкции верхней рамы бака, длины прямого участка наружного ряда труб a (a_2 на рис. 9-12), формы сечения трубы и метода приварки дна и верхней рамы к стенке бака.

После определения основных размеров бака и выбора формы сечения трубы и числа рядов труб определяются размеры труб во всех рядах и подсчитываются поверхности излучения и конвекции бака трансформатора в следующем порядке.

Размеры поперечного сечения трубы, радиус закругления, шаг труб в ряду t_r и шаг между рядами t_p определяются по табл. 9-7. Прямой участок a_1 для внутреннего ряда труб принимается равным $a_1 = 5,0$ см. Далее определяются: $a_2 = a_1 + t_p$; $a_3 = a_2 + t_p$ и т. д.

По табл. 9-8 для принятой формы сечения трубы по размеру наружного ряда труб выбираются минимальные значения c и e . Затем находятся расстояния между осями труб на стенке бака, начиная с наружного ряда труб (с номером n):

наружный ряд $b_n = H - c - e$;

второй ряд снаружи $b_{n-1} = b_n - 2t_p$;

третий ряд $b_{n-2} = b_{n-1} - 2t_p$.

Развернутая длина трубы в каждом ряду:

1-й (внутренний) ряд $l_1 = b_1 - 2R + \pi R + 2a_1 = b_1 + 1,14R + 2a_1$;

Таблица 9-8

Минимальные расстояния оси трубы от дна и крышки бака
для нормальных серий трансформаторов.

Трубы круглого сечения $\varnothing 5,1$ см (рис. 9-12)

a , см	5—8	10—15	17—20	25—28
c_{\min}	6	7,5	9,0	12,0
e_{\min}	7	8,5	10,0	13,0

Примечание. Для труб овального сечения $7,2 \times 2,0$ см при тех же размерах a значения c_{\min} и e_{\min} , найденные из таблицы, увеличивать на 1 см.

2-й ряд $l_2 = l_1 + 4t_p$;

3-й ряд $l_3 = l_2 + 4t_p$ и т. д.

При выводе этих формул принято $a_2 = a_1 + t_p$; $a_3 = a_2 + t_p$ и т. д.

Число труб в одном ряду на поверхности бака овальной формы

$$m_{\text{тр}} = \frac{2(A - B) + \pi B}{t_p} \quad (9-37)$$

Поверхность излучения бака с трубами

$$P_{\text{н}} = \{2(A - B) + \pi[B + 2a_1 + 2R + 2t_p(n - 1) + d]\} H \cdot 10^{-4} + 0,5P_{\text{кр}}, \quad (9-38)$$

где d — диаметр круглой трубы или больший размер поперечного сечения овальной трубы, см.

Поверхность конвекции бака

$$P_{\text{к}} = P_{\text{к.гл}} k_{\text{ф.гл}} + P_{\text{к.тр}} k_{\text{ф.тр}}, \quad (9-39)$$

где $k_{\text{ф.гл}}$ и $k_{\text{ф.тр}}$ — коэффициенты, определяемые по табл. 9-6;

$P_{\text{к.гл}}$ — поверхность конвекции гладкого бака и крышки по (9-36), м^2 ;

$P_{\text{к.тр}}$ — поверхность конвекции труб, м^2 ;

$$P_{\text{к.тр}} = P_{\text{м}} (m_1 l_1 + m_2 l_2 + \dots + m_n l_n) \cdot 10^{-2}, \quad (9-40)$$

здесь $P_{\text{м}}$ — поверхность метра трубы по табл. 9-7, м^2 .

Если $P_{\text{к}}$, найденная по (9-39), равна или немного больше необходимой поверхности конвекции, найденной по (9-30), то следует переходить к расчету превышения температуры обмоток и масла трансформатора над воздухом по § 9-7. Если полученная поверхность конвекции меньше необходимой или существенно больше её, следует произвести соответствующую корректировку размеров бака или труб и затем переходить к расчету превышений температуры. Увеличение поверхности может быть получено за счет увеличения прямого участка a всех рядов труб на 5—7 см, за счет увеличения высоты бака или числа рядов труб. Уменьшение поверхности может быть достигнуто путем уменьшения высоты бака, уменьшения числа рядов труб или числа труб в ряду.

Бак с навесными радиаторами. Охлаждаемая поверхность бака с радиаторами образуется главным образом

развернутой поверхностью радиаторов. Эта конструкция позволяет получить значительно большие поверхности охлаждения, чем конструкция трубчатого бака при одинаковых внутренних его размерах. Число радиаторов и их расположение определяются необходимой поверхностью охлаждения и необходимостью получить наименьший общий габарит бака.

Конструкция радиатора обычно состоит из двух коллекторов — прямоугольных или другой формы, т. е. стальных коробок, в которые ввариваются своими верхними и нижними концами трубы или волны. Радиатор фланцами своих коллекторов присоединяется к баку трансформатора. Возможно применение труб или волн различной формы и размеров, а также различные способы сочетания их с коллекторами.

На рис. 9-13, а показаны принципиальная конструкция и основные размеры двойного трубчатого радиатора, нашедшего в СССР широкое применение на трансформаторах мощностью от 2500 до 63 000 кВ·А. Радиатор состоит из четырех рядов круглых труб, по 16 труб в ряду, изогнутых по концам подобно трубам трубчатого бака и

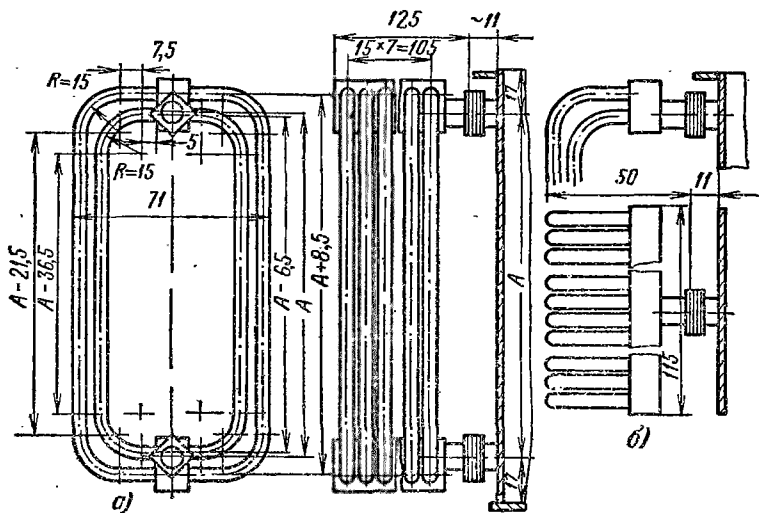


Рис. 9-13. Трубчатый радиатор для естественного масляного охлаждения с гнутыми трубами. Размеры в сантиметрах.

а — двойной радиатор с числом труб $2 \times 2 \times 16 = 64$; б — одинарный радиатор с числом труб $2 \times 16 = 32$.

сваренных в два прямоугольных коллектора. Коллекторы на торцах снабжены двумя круглыми патрубками с фланцами, служащими для присоединения радиатора к баку трансформатора. При этом коллекторы располагаются радиально по отношению к поверхности бака. В радиаторах этой конструкции применяются те же трубы круглого сечения, что и в трубчатых баках с теми же диаметром, толщиной стенки, поверхностью и массой 1 м, радиусом закругления, шагом труб в ряду и между рядами (табл. 9-7).

Радиаторы применяются как двойные описанной конструкции с четырьмя рядами труб, так и одинарные с двумя рядами труб, только с одной стороны коллекторов (рис. 9-13, б). Коллекторы одинарных радиаторов располагаются тангенциально к поверхности бака. Выпускаются радиаторы нескольких размеров, отличающиеся только общей длиной, характеризуемой расстоянием A между осями патрубков, служащих для присоединения радиатора к баку трансформатора. Основные данные нормальной серии одинарных и двойных радиаторов приведены в табл. 9-9.

Таблица 9-9

Основные данные трубчатых радиаторов по рис. 9-13

Размер A , см	Одинарный радиатор			Двойной радиатор		
	$P_{к.тр.}$ м ²	$G_{ст.}$ кг	$G_{м.}$ кг	$P_{к.тр.}$ м ²	$G_{ст.}$ кг	$G_{м.}$ кг
188	11,45	205	161	22,9	380	276
200	12,1	215	169	24,15	401	291
228,5	13,55	236	184	27,05	442	321
248,5	14,55	249	194	29,1	468	341
268,5	15,6	264	204	31,15	499	362
300	17,2	285	219	34,35	540	393
325	18,45	302	232	36,9	575	418
375	21,0	337	258	42,0	644	469
400	22,3	352	269	44,6	675	492
425	24,6	373	284	47,2	716	521

Примечание. $P_{к.тр.}$ — поверхность конвекции труб; поверхность коллектора $P_{к.}$ одинарного радиатора 0,72 м², двойного 0,66 м²; $G_{ст.}$ — масса радиатора без масла; $G_{м.}$ — масса масла в радиаторе.

Радиаторы описанной конструкции хорошо зарекомендовали себя в эксплуатации, однако в некоторых случаях с трудом размещаются на баке трансформатора.

Поиск новых более компактных конструкций, а также новых технологических решений привел к появлению радиаторов с прямыми вертикальными трубами. Эти радиаторы также находят применение, однако, если прямые трубы ввариваются в коробки коллекторов в верхней и нижней частях радиатора, приходится считаться с неизбежным ухудшением

теплоотдачи с единицы поверхности радиатора вследствие затруднения доступа воздуха в радиатор и выхода его из радиатора.

Радиаторы с прямыми трубами по рис. 9-14 находят применение в трансформаторах мощностью от 100 до 6300 кВ·А. Некоторое упрощение технологии изготовления баков этих трансформаторов вследствие раздельного изготовления собственно баков (без труб) и радиаторов по мнению технологов компенсирует необходимое

Рис. 9-14. Трубчатый радиатор с прямыми трубами. Размеры в сантиметрах.

в этом случае увеличение поверхности и удорожание системы охлаждения трансформатора.

Таблица 9-10

Основные данные трубчатых радиаторов с прямыми трубами по рис. 9-14

Размер А, см	Поверх- ность $P_{к.тр, м^2}$	Масса, кг		Размер А, см	Поверх- ность $P_{к.тр, м^2}$	Масса, кг	
		стали	масла			стали	масла
71	1,98	52,6	28,6	180	5,48	92,3	45,8
90	2,60	59,5	31,6	200	6,10	99,5	49,0
115	3,40	68,6	35,6	220	6,75	106,8	52,2
140	4,20	77,6	39,5	240	7,40	114	55,3
161,5	4,88	85,5	42,9				

Примечание. Поверхность двух коллекторов $P_{к} \approx 0,4 \text{ м}^2$.

Конструкция радиатора с прямыми трубами показана на рис. 9-14, справочные данные по ряду радиаторов приведены в табл. 9-10.

При тепловом расчете бака с навесными радиаторами предварительно по (9-35') приближенно определяется поверхность излучения бака применительно к основным размерам бака. Затем по (9-30) рассчитывается необходимая поверхность конвекции P_k и по данным табл. 9-9 подбираются соответствующее число и размеры одинарных или двойных трубчатых радиаторов. При этом поверхность конвекции гладкого бака $P_{k,г.л}$ и крышки $P_{k,кр}$ подсчитывается для реальных размеров бака, а поверхности конвекции труб $P_{k,тр}$ и коллекторов радиаторов $P_{k,к}$ находятся по табл. 9-9 и 9-10. Для бака овальной формы

$$P_{k,г.л} = [2(A - B) + \pi B] H \cdot 10^{-4}.$$

При подборе размеров радиаторов следует учитывать, что минимальное расстояние от дна или от крышки бака до горизонтальной оси ближайшего патрубка радиатора по рис. 9-13 должно быть не меньше 17 см и, следовательно, размер A радиатора (рис. 9-13) должен удовлетворять неравенству $A \leq H - 34$. Для радиатора с прямыми трубами эти размеры принимать по рис. 9-14. При размещении радиатора на баке следует оставлять минимальные промежутки между трубами соседних радиаторов; при параллельном расположении коллекторов 16 см для двойных и 10 см для одинарных радиаторов; при размещении коллекторов под углом — 10 см для двойных и 7 см для одинарных радиаторов. Полная поверхность конвекции бака с радиаторами определяется по (9-41) и должна быть равной поверхности, найденной по (9-30), или несколько превышать ее. Если при полном использовании боковой поверхности бака для размещения двойных радиаторов поверхность конвекции P_k оказывается недостаточной, следует переходить от естественного охлаждения к дутьевому:

$$P_k = P_{k,г.л} k_{ф,г.л} + P_{k,кр} k_{ф,кр} + P_{k,тр} k_{ф,тр} + P_{k,к} k_{ф,г.л}. \quad (9-41)$$

Коэффициенты $k_{ф}$, учитывающие форму поверхности и условия теплоотдачи, могут быть взяты по табл. 9-6. После окончательного размещения радиаторов на баке поверхность излучения $P_{и}$ уточняется по реальным размерам бака и радиаторов.

9-7. ОКОНЧАТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ПРЕВЫШЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТОК И МАСЛА ТРАНСФОРМАТОРА

После окончательного установления размеров бака и определения поверхностей излучения и конвекции необходимо подсчитать действительные превышения температур обмоток и масла над воздухом. Подсчет производится для потерь, повышенных на 5% против расчетной величины $P_x + P_k$ при индивидуальном расчете и на 10% против гарантийной величины $P_x + P_k$ при расчете серии.

Среднее превышение температуры стенки бака над окружающим воздухом

$$\Theta_{б.в} = \left[\frac{k (P_x + P_k)}{2,8\Pi_n + 2,5\Pi_k} \right]^{0,8}, \quad (9-42)$$

где $k = 1,05 \div 1,10$.

Среднее превышение температуры масла вблизи стенки над стенкой бака может быть приближенно подсчитано по опытной формуле, аналогичной (9-19):

$$\Theta_{м.б} = k_1 \cdot 0,165 \left[\frac{k (P_x + P_k)}{\Sigma \Pi_k} \right]^{0,6}, \quad (9-43)$$

где $\Sigma \Pi_k$ — сумма поверхностей конвекции гладкой части труб, волн, крышки без учета коэффициентов улучшения или ухудшения конвекции;
 k_1 — коэффициент, равный 1,0 при естественном масляном охлаждении и 0,9 при охлаждении с дутьем.

Превышение температуры масла в верхних слоях над окружающим воздухом

$$\Theta_{м.в.в} = \sigma (\Theta_{б.в} + \Theta_{м.б}). \quad (9-44)$$

Коэффициент σ для трубчатых баков и баков с радиаторами может быть принят равным 1,2.

Превышение температуры обмоток над окружающим воздухом подсчитывается для обмоток ВН и НН отдельно

$$\Theta_{о.в} = \Theta_{о.ср} + \Theta_{о.м} + \Theta_{м.б} + \Theta_{б.в}. \quad (9-45)$$

Превышения температуры масла в верхних слоях и обмоток над окружающим воздухом, подсчитанные по

(9-44) и (9-45), не должны быть больше допустимых для масляных трансформаторов по ГОСТ или по техническим условиям (заданию на расчет). При получении более высоких значений $\Theta_{м.в.в}$ или $\Theta_{о.в}$ следует увеличить поверхность охлаждения бака. При получении $\Theta_{м.в.в}$ и $\Theta_{о.в}$, пониженных против нормы более чем на 5°C , поверхность охлаждения бака должна быть соответственно уменьшена.

9.8. ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ КОНСТРУКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И МАСЛА ТРАНСФОРМАТОРА

Масса активных материалов трансформатора с достаточной точностью определяется при его расчете. Точные массы конструктивных и других материалов и масла трансформатора могут быть найдены только после подробной разработки его конструкции. Однако в процессе расчета может возникнуть необходимость в приближенном определении этих масс для оценки экономичности различных вариантов расчета.

Масса конструктивной стали остова может быть приближенно принята 0,10 суммарной массы провода обмоток и стали магнитной системы. Масса картона в изоляции обмоток зависит от мощности и класса напряжения трансформатора. С ростом мощности относительная масса картона уменьшается. Для трансформаторов с медными обмотками можно принять массу картона 0,12—0,15 массы провода при классах напряжения 6, 10, 35 кВ и 0,35—0,3 при классе напряжения 110 кВ. Для алюминиевых обмоток относительная масса картона увеличивается в 2,4 раза.

Масса активной части, т. е. остова с обмотками и отводами (но без крышки), может быть приближенно определена по формуле

$$G_{а.ч} \approx 1,2 (G_{пр} + G_{ст}).$$

Массу бака нетрудно определить по известной из теплового расчета поверхности бака и поверхности крышки с учетом толщины стенок, крышки и дна бака, принимая $\gamma_{ст} = 7850 \text{ кг/м}^3$. Масса охлаждающих труб находится по их общей длине и массе погонного метра (табл. 9-7); масса радиаторов — по табл. 9-9 и 9-10.

Для определения массы масла необходимо знать внутренний объем V гладкого бака и объем, занимаемый активной частью, $V_{a.ч}$. Для определения $V_{a.ч}$ можно воспользоваться приближенной формулой $V_{a.ч} = G_{a.ч} / \gamma_{a.ч}$, где средняя плотность активной части $\gamma_{a.ч} = 5500 \div 6000 \text{ кг/м}^3$ для трансформаторов с медными обмотками и $\gamma_{a.ч} = 5000 \div 5500 \text{ кг/м}^3$ для трансформаторов с алюминиевыми обмотками.

Общую массу масла можно определить по формуле

$$G_m = 1,05 [0,9(V_6 - V_{a.ч}) + G_{m.эл}],$$

где 1,05 — коэффициент, учитывающий массу масла в расширителе;

$G_{m.эл}$ — масса масла в элементах системы охлаждения труб или радиаторах.

Масса масла в трубах определяется по их общей длине и массе масла в 1 м (табл. 9-7); масса масла в радиаторах по табл. 9-9 и 9-10.

9-9. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА ТИПА ТМ-1600/35

Ввиду того что суммарные потери короткого замыкания и холостого хода для двух вариантов расчета трансформатора с медными и алюминиевыми обмотками отличаются мало, полный тепловой расчет проводим только для варианта I_m — с медными обмотками

Тепловой расчет обмоток (по § 9-5). Внутренний перепад температуры.

Обмотка НН по (9-9) и по рис. 9-7.

$$\Theta_{o1} = \frac{q_1 \delta}{\lambda_{из}} 10^{-4} = \frac{958 \cdot 0,025}{0,0017} \cdot 10^{-4} = 1,4^\circ\text{C},$$

где δ — толщина изоляции провода на одну сторону, $q = 0,025 \text{ см}$;
 $\lambda_{из}$ — теплопроводность бумажной, пропитанной лаком изоляции провода в масле, по табл. 9-1 $\lambda_{из} = 0,0017 \text{ Вт/(см} \times ^\circ\text{C)}$.

Обмотка ВН по формуле (9-9) и по рис. 9-7

$$\Theta_{o2} = \frac{q_2 \delta}{\lambda_{из}} = \frac{1134 \cdot 0,025}{0,0017} \cdot 10^{-4} = 1,7^\circ\text{C}.$$

Перепад температуры на поверхности обмоток по (9-20):
Обмотка НН

$$\Theta_{o1} = k_1 k_2 k_3 \cdot 0,35 q^{0,6} = 1,0 \cdot 1,1 \cdot 0,85 \cdot 0,35 \cdot 958^{0,6} = 20,1^\circ\text{C},$$

где $k_1 = 1,0$ для естественного масляного охлаждения;
 $k_2 = 1,1$ для внутренней обмотки НН;
 $k_3 = 0,85$ по табл. 9-3 для $h_k/a = 0,5/3,0$.

Обмотка ВН

$$\Theta_{0.м2} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,9 \cdot 0,35 \cdot 1134^{0,6} = 21,4^{\circ}\text{C},$$

где $k_2 = 1,0$ для наружной обмотки ВН;
 $k_3 = 0,9$ по табл. 9-3 для $h_k/a = 0,5/3,7$.

Полный средний перепад температуры от обмотки к маслу.
 Обмотка НН

$$\Theta_{0.м.ср} = \Theta_{0.1} + \Theta_{0.м1} = 1,4 + 20,1 = 21,5^{\circ}\text{C}.$$

Обмотка ВН

$$\Theta_{0.м.ср} = 1,7 + 21,4 = 23,1^{\circ}\text{C}.$$

Тепловой расчет бака (по § 9-6). По табл. 9-4 в соответствии с мощностью трансформатора выбираем конструкцию гладкого бака с трубами. Минимальные внутренние размеры бака — по рис. 9-15, а

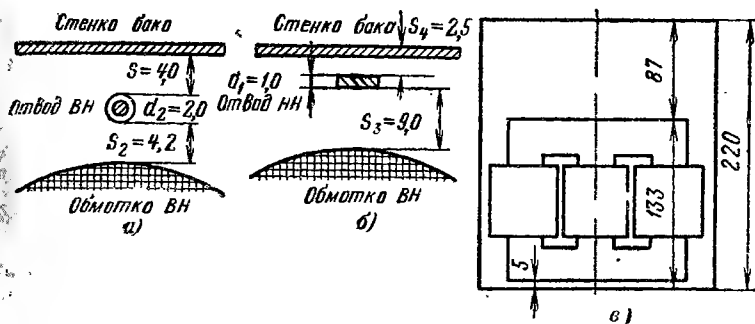


Рис. 9-15. Трансформатор ТМ-1600/35. Вариант I_м. Размеры в сантиметрах.

а и б — определение основных расстояний от обмотки ВН до стенки бака;
 в — размещение активной части трансформатора в баке.

и б. Изоляционные расстояния отводов определяем до прессующей балки верхнего ярма и до стенки бака. До окончательной разработки конструкции внешние габариты прессующих балок ярем принимаем равными внешнему габариту обмотки ВН.

Минимальная ширина бака (рис. 9-15, а, б)

$$B = D_2^* + s_1 + s_2 + d_2 + s_3 + s_4 + d_1.$$

Изоляционные расстояния:

$s_1 = 4,0$ см (для отвода $U_{нсп} = 85$ кВ, покрытие 0,4 см, расстояние от стенки бака по табл. 4-11);

$s_2 = 4,2$ см (для отвода $U_{нсп} = 85$ кВ, покрытие 0,4 см, расстояние до прессующей балки ярма по табл. 4-11);

$s_3 = 2,5$ см (для отвода $U_{нсп} = 5$ кВ, без покрытия, расстояние до стенки бака по табл. 4-11);

$s_4 = 9,0$ см (для отвода $U_{нсп} =$ до 35 кВ, для обмотки $U_{нсп} = 85$ кВ, отвод без покрытия по табл. 4-12).

Ширина бака

$$B_{\text{мин}} = 49,8 + 4,0 + 4,2 + 2,0 + 2,5 + 9,0 + 1,0 = 72,5 \text{ см.}$$

Принимаем $B=76$ см при центральном положении трансформатора в баке.

Длина бака

$$A = 2C + D_2'' + s_5 = 2 \cdot 53 + 49,8 + 2 \cdot 9 = 173,8 \approx 175 \text{ см.}$$

Глубина бака

$$H_6 = H_{\text{с.ч}} + H_{\text{я.к}} = 133 + 85 = 218 \approx 220 \text{ см.}$$

Высота активной части по рис. 9-15 $H_{\text{а.ч}} = 133$ см.

Принимаем $H_{\text{я.к}} = 85$ см (см. сноску к табл. 9-5). Допустимое превышение средней температуры масла над окружающим воздухом

$$\Theta_{\text{м.в}} = 65 - 23,1 = 41,9^\circ\text{C}$$

(для наиболее нагретой обмотки ВН). Найденное среднее превышение может быть допущено, так как превышение температуры масла в верхних слоях в этом случае будет:

$$\Theta_{\text{м.в.в}} = 1,2 \Theta_{\text{м.в}} = 1,2 \cdot 41,9 = 50,3 < 55^\circ\text{C.}$$

Принимая предварительно перепад на внутренней поверхности стенки бака $\Theta_{\text{м.б}} = 5^\circ$ и запас в 2°C , находим среднее превышение температуры стенки бака над воздухом

$$\Theta_{\text{б.в}} = \Theta_{\text{м.в}} - \Theta_{\text{м.б}} = 41,9 - 5 - 2 = 34,9^\circ\text{C.}$$

Для выбранных размеров бака рассчитываем поверхность конвекции гладкой части бака

$$\begin{aligned} P_{\text{к.гл}} &= [2(A - B) + \pi B] H_6 \cdot 10^{-4} = \\ &= [2(175 - 76) + 76\pi] 220 \cdot 10^{-4} = 9,61 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Ориентировочная поверхность излучения бака трансформатора по (9-35')

$$P_{\text{и}} = P_{\text{к.гл}} k = 9,61 \cdot 1,3 = 12,5 \text{ м}^2.$$

Ориентировочная необходимая поверхность конвекции для заданного значения $\Theta_{\text{б.в}} = 34,9^\circ\text{C}$ по (9-30):

$$\begin{aligned} P_{\text{к}}' &= \frac{1,05 (P_{\text{к}} + P_{\text{х}})}{2,5 \Theta_{\text{б.в}}^{1,25}} - 1,12 P_{\text{и}} = \frac{1,05 (17\,705 + 3322)}{2,5 \cdot 34,9^{1,25}} - \\ &- 1,12 \cdot 12,5 = 90,1 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

По табл. 9-7 для мощности 1600 кВ·А выбираем бак с двумя рядами овальных труб. Шаг между рядами $t_p = 10$ см; размеры трубы $7,5 \times 2,0$ см; радиус закругления трубы $R = 18,8$ см; прямой участок трубы внутреннего ряда $a_1 = 10$ см, второго ряда $a_2 = a_1 + t_p = 10 + 10 = 20$ см; расстояния между осями труб для наружного

ряда $b_2 = H_5 - c - e = 220 - 10 - 11 = 199$ см (для овальных труб при $a_2 = 20$ см) по табл. 9-8; $c_{\text{мин}} = 9 + 1 = 10$ см; $e_{\text{мин}} = 10 + 1 = 11$ см.

Размеры трубчатой стенки принимаются по рис. 9-16.

Для внутреннего ряда труб

$$b_1 = b_2 - 2t_p = 199 - 2 \cdot 10 = 179 \text{ см.}$$

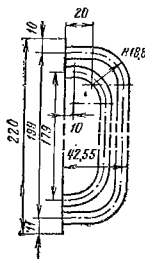
Длина трубы внутреннего ряда

$$l_1 = (b_1 - 2R) + \pi R + 2a_1 = 179 - 2 \cdot 18,8 + \pi \cdot 18,8 + 2 \cdot 10 = 220,4 \text{ см.}$$

Длина трубы наружного ряда

$$l_2 = l_1 + 4t_p = 220,4 + 4 \cdot 10 = 260,4 \text{ см.}$$

Рис. 9-16. Основные размеры трубчатой стенки бака трансформатора ТМ-1600/35.



Длина двух труб

$$l_1 + l_2 = 220,4 + 260,4 = 480,8 \text{ см} = 4,808 \text{ м.}$$

Необходимая поверхность конвекции труб

$$P_{\text{к.тр}} = P'_{\text{к}} - P_{\text{к.гл}} = 90,1 - 9,6 = 80,5 \text{ м}^2.$$

Необходимая фактическая поверхность труб

$$P_{\text{тр}} = \frac{P_{\text{к.тр}}}{k_{\text{ф}}} = \frac{80,5}{1,344} = 60 \text{ м}^2,$$

где $k_{\text{ф}} = 1,344$ по табл. 9-6 для двух рядов труб.

При поверхности 1 м трубы $0,16 \text{ м}^2$ (табл. 9-7) необходимо иметь общую длину труб

$$L = \frac{P_{\text{тр}}}{0,16} = \frac{60}{0,16} = 375 \text{ м.}$$

Число труб в ряду для обеспечения этой общей длины должно быть:

$$m_{\text{тр}} = \frac{L}{l_1 + l_2} = \frac{375}{4,808} = 78;$$

принимаем 76 труб; шаг труб в ряду

$$\left\{ t_{\text{т}} = \frac{2(A-B) + \pi B}{m_{\text{тр}}} = \frac{2(175 - 76) + 3,14 \cdot 76}{76} = 5,75 \text{ см.} \right.$$

Поверхность излучения бака по внешнему периметру бака по трубам по (9-38)

$$P_{\text{из}} = [2(A - B) + \pi(B + 2a_1 + 2R + 2t_p + d)] H_6 \cdot 10^{-4} + 0,5 P_{\text{кр}} = \\ = [2(175 - 76) + \pi(76 + 2 \cdot 10 + 2 \cdot 18,8 + 2 \cdot 10 + \\ + 7,5)] 220 \cdot 10^{-4} + 0,8 = 16,3 \text{ м}^2.$$

Поверхность крышки

$$P_{\text{кр}} = \pi \frac{(B + 16)^2}{4} \cdot 10^{-4} + (A - B)(B + 16) \cdot 10^{-4} = \pi \frac{(76 + 16)^2}{4} \cdot 10^{-4} + \\ + (175 - 76)(76 + 16) 10^{-4} = 1,6 \text{ м}^2.$$

Поверхность конвекции бака по (9-39)

$$P_{\text{к}} = P_{\text{к-гл}} k_{\text{ф-гл}} + P_{\text{тр}} k_{\text{ф-тр}} + P_{\text{кр}} k_{\text{ф-кр}} = 9,6 \cdot 1 + \\ + 58,5 \cdot 1,344 + 1,6 \cdot 0,5 = 88,9 \text{ м}^2.$$

Поверхность труб (фактическая) $P_{\text{тр}} = 76 \cdot 4,808 \cdot 0,16 = 58,5 \text{ м}^2$.
Определение превышений температуры обмоток и масла над окружающим воздухом — по § 9-7.

Среднее превышение температуры стенки бака (трубы) по (9-42)

$$\Theta_{\text{б.в}} = \left[\frac{1,05(P_{\text{к}} + P_{\text{х}})}{2,8 P_{\text{и}} + 2,5 P_{\text{к}}} \right]^{0,8} = \left[\frac{1,05(17705 + 3322)}{2,8 \cdot 16,3 + 2,5 \cdot 88,9} \right]^{0,8} = 34,2^\circ\text{C}.$$

Среднее превышение температуры масла вблизи стенки бака над температурой стенки (трубы) по (9-43)

$$\Theta_{\text{м.б}} = 0,165 \left[\frac{1,05(P_{\text{к}} + P_{\text{х}})}{P_{\text{тр}} + P_{\text{гл}} + P_{\text{кр}} \cdot 0,5} \right]^{0,6} = \\ = 0,165 \left[\frac{1,05(17705 + 3322)}{58,5 + 9,6 + 0,8} \right]^{0,6} = 5,3^\circ\text{C}.$$

Превышение средней температуры масла над температурой окружающего воздуха

$$\Theta_{\text{м.в}} = \Theta_{\text{м.б}} + \Theta_{\text{б.в}} = 5,3 + 34,2 = 39,5^\circ\text{C}.$$

Превышение температуры масла в верхних слоях

$$\Theta_{\text{м.з.в}} = \sigma \Theta_{\text{м.в}} = 1,2 \cdot 39,5 = 47,4^\circ\text{C} < 55^\circ\text{C}.$$

Превышение температуры обмоток над воздухом:

$$\text{ВН } \Theta_{\text{о.в2}} = \Theta_{\text{о.м.ср}} + \Theta_{\text{м.в}} = 23,1 + 39,5 = 62,6^\circ\text{C} < 65^\circ\text{C}.$$

$$\text{НН } \Theta_{\text{о.в1}} = \Theta_{\text{о.м.ср}} + \Theta_{\text{м.в}} = 21,5 + 39,5 = 61,0^\circ\text{C} < 65^\circ\text{C}.$$

Превышение температуры масла в верхних слоях $\Theta_{\text{м.з.в}} < 55^\circ\text{C}$ и обмоток $\Theta_{\text{о.в}} < 65^\circ\text{C}$ лежат в пределах допустимого нагрева по ГОСТ 11677-75.

В обмотке НН винтовой без радиальных каналов и обмотке ВН многослойной цилиндрической из прямоугольного провода возникает внутренний перепад температуры, определяемый по (9-10).

Обмотка НН. Потери в 1 см³ объема обмотки по (9-16')

$$p_1 = \frac{3,44 \cdot 1,78^2 \cdot 0,283 \cdot 1,68}{0,333 \cdot 1,73} \cdot 10^{-2} = 0,09 \text{ Вт/см}^3.$$

При отсутствии междуслойной изоляции по (9-17) и (9-18) находим теплопроводность

$$\lambda_{\text{ср}} = \lambda = 0,0017 \frac{1,68 \cdot 0,333}{2 \cdot 0,025 \cdot 1,73} = 0,012 \text{ Вт/(см} \cdot ^\circ\text{C)}.$$

Внутренний перепад температуры по (9-10)

$$\Theta_o = \frac{0,09 (4 \cdot 0,333)^2}{8 \cdot 0,012} = 1,67^\circ\text{C},$$

где радиальный размер одного слоя обмотки НН $4 \cdot 0,333 = 1,33$ см. Средний перепад температуры

$$\Theta_{o,\text{ср}} = \frac{2}{3} 1,67 = 1,1^\circ\text{C}.$$

Перепад температуры на поверхности обмотки по (9-19)

$$\Theta_{o,\text{м}} = 0,285 \cdot 786^{0,6} = 15,6^\circ\text{C}.$$

Полный средний перепад температуры от обмотки НН к маслу

$$\Theta_{o,\text{м.ср}} = 1,1 + 15,6 = 16,7^\circ\text{C}.$$

Обмотка ВН

$$p_2 = \frac{3,44 \cdot 1,62^2 \cdot 0,305 \cdot 0,55}{0,355 \cdot 0,6} \cdot 10^{-2} = 0,071 \text{ Вт/см}^3;$$

$$\lambda = 0,0017 \frac{0,55 \cdot 0,355}{2 \cdot 0,025 \cdot 0,6} = 0,011 \text{ Вт/(см} \cdot ^\circ\text{C)}.$$

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{0,011 \cdot 0,0017 (0,355 + 0,096)}{0,011 \cdot 0,096 + 0,0017 \cdot 0,355} = 0,0051 \text{ Вт/(см} \cdot ^\circ\text{C)},$$

где $\delta = 8 \cdot 0,012 = 0,096$ см (кабельная бумага).

$$\text{Внутренний перепад температуры } \Theta_o = \frac{0,071 \cdot 3,16^2}{8 \cdot 0,0051} = 17,4^\circ\text{C},$$

где радиальный размер наружной катушки Г обмотки ВН $0,355 + 4 \cdot 0,096 = 3,16$ см.

$$\text{Средний внутренний перепад } \Theta_{o,\text{ср}} = \frac{2}{3} 17,4 = 11,6^\circ\text{C}.$$

Перепад температуры на поверхности обмотки

$$\Theta_{0.м} = 0,285 \cdot 695^{0,6} = 14,5^{\circ}\text{C},$$

где

$$q = \frac{P_{к2}}{П_{02}} = \frac{8925}{12,87} = 695 \text{ Вт/м}^2.$$

Среднее превышение температуры обмотки ВН над маслом

$$\Theta_{0.м.ср} = 11,6 + 14,5 = 26,1^{\circ}\text{C}.$$

Глава десятая

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

10-1. ПРИМЕР РАСЧЕТА ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТИПА ТСЗ-250/10, 250 кВ·А С ЕСТЕСТВЕННЫМ ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Задание на проект трансформатора

Рассчитать трансформатор со следующими данными: номинальная мощность $S=250$ кВ·А; число фаз $m=3$; частота $f=50$ Гц; напряжение ВН $U_2=10\,000 \pm (2 \times 2,5\%)$ В; напряжение НН $U_1=400$ В; схема и группа соединений $Y/Y-0$.

Способ охлаждения — естественное воздушное, характер нагрузки — длительная. Установка — внутриздания.

Напряжение и потери короткого замыкания $u_k=5,5\%$; $P_k=3500$ Вт. Ток и потери холостого хода $i_0=2,2\%$; $P_x=920$ Вт.

Трансформатор должен быть рассчитан с обмотками из алюминиевого провода с изоляцией класса нагревостойкости В. Расчет производится для трехфазного трансформатора стержневого типа с плоской магнитной системой и concentрическими обмотками.

Определение основных электрических величин (по § 3-2):

Мощность одной фазы $S_{\phi}=250/3=83,3$ кВ·А.

Мощность обмоток одного стержня $S'=250/3=83,3$ кВ·А.

Номинальные токи:

$$\text{ВН } I_2 = \frac{250 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10\,000} = 14,4 \text{ А};$$

$$\text{НН } I_1 = \frac{250 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 361 \text{ А}.$$

Фазные токи при схеме соединения Y/Y_1

$$I_{\phi 2} = I_2 = 14,4 \text{ А}; \quad I_{\phi 1} = I_1 = 361 \text{ А}.$$

Фазные напряжения:

$$\text{ВН } U_{\text{фз}} = \frac{10\,000}{\sqrt{3}} = 5770 \text{ В};$$

$$\text{НН } U_{\text{фн}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ В}.$$

Испытательные напряжения обмоток (табл. 4-2): обмотки ВН $U_{\text{исп}} = 24 \text{ кВ}$; обмотки НН $U_{\text{исп}} = 3 \text{ кВ}$.

Выбор исходных данных расчета

1. Мощность обмоток одного стержня $S' = 83,3 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

2. Ширина приведенного канала рассеяния между обмотками НН и ВН. Для $U_{\text{исп}} = 24 \text{ кВ}$ по табл. 4-15 $a_{12} = 3,5 \text{ см}$; $\delta_{12} = 0,5 \text{ см}$. По табл. 9-2 вертикальный воздушный канал должен быть не менее $0,8 \text{ см}$; при толщине цилиндра $\delta_{12} = 0,5 \text{ см}$ в промежутке a_{12} образуются два канала по $1,5 \text{ см}$. По (3-28) и табл. 3-3 находим:

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = 0,56 \cdot 1,25 \sqrt[4]{83,3} = 2,11 \text{ см};$$

$$a_p = 3,5 + 2,11 = 5,61 \text{ см}.$$

3. Коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному полю k_p принимаем равным $0,95$.

4. Частота $f = 50 \text{ Гц}$.

5. Составляющие напряжения короткого замыкания:

$$\text{активная } u_a = \frac{3500}{10 \cdot 250} = 1,4\%; \text{ реактивная } u_p = \sqrt{5,5^2 - 1,4^2} = 5,32\%.$$

6. Выбираем рулонную холоднокатаную текстурованную сталь марки Э330А с толщиной листов $0,35 \text{ мм}$ по ГОСТ 802-58. Удельные потери при $B = 1,5 \text{ Т}$ $p = 1,1 \text{ Вт/кг}$ (табл. 2-5). Выбираем индукцию в стержне $B_c = 1,43 \text{ Т}$ (табл. 2-9); коэффициент усиления ярма $k_{\text{я}} = 1,02$; прессовка стержней — расклиниванием с обмоткой; прессовка ярм — балками (табл. 2-3). Конструкция крепления и стяжки остова — без сквозных шпилек в стержнях и ярмах. Четыре крайних стыка стержней и ярм косые, на среднем стержне стыки прямые.

В сечении стержня шесть ступеней без каналов; $k_{\text{кр}} = 0,92$; сечение ярма повторяет сечение стержня. Изоляция пластин — жаростойкое покрытие с однократной лакировкой; $k_s = 0,93$ (табл. 2-2 и 2-6); $k_c = 0,92 \cdot 0,93 = 0,856$.

Индукция в ярме $B_{\text{я}} = 1,43/1,02 = 1,4 \text{ Т}$. Удельные потери в стали стержня и ярма

$$p_0 = 0,99 \text{ Вт/кг}; \quad p_{\text{я}} = 0,945 \text{ Вт/кг};$$

удельные намагничивающие мощности

$$q_0 = 1,72 \text{ В} \cdot \text{А/кг}; \quad q_{\text{я}} = 1,65 \text{ В} \cdot \text{А/кг};$$

для зазоров — при $B_c = 1,43 \text{ Т}$ $q_z = 1,28 \text{ В} \cdot \text{А/см}^2$.

7. Основные изоляционные расстояния: стержень — обмотка НН $a_{01} = 1,5$ см (табл. 4-16 и 9-2)

$$\left. \begin{array}{ll} \text{обмотка НН — обмотка ВН} & a_{12} = 3,5 \text{ см} \\ \text{цилиндр между НН и ВН} & \delta_{12} = 0,5 \text{ см} \\ \text{между обмотками ВН} & a_{22} = 3,0 \text{ см} \\ \text{междуфазная перегородка} & \delta_{22} = 0,5 \text{ см} \\ \text{от обмотки ВН до ярма} & l_0 = 8,0 \text{ см} \\ \text{выступ цилиндра} & l_{12} = 3,5 \text{ см} \end{array} \right\} U_{\text{исп}} = 24 \text{ кВ} \text{ (табл. 4-15).}$$

8. Выбор β может быть сделан в соответствии с указаниями § 3-6 с проведением предварительного расчета по обобщенному методу или по табл. 3-12. Для трансформатора типа ТСЗ-250/10 с алюминиевыми обмотками принимаем предварительно $\beta = 1,4$ (табл. 3-12). Тогда диаметр стержня по (3-17)

$$d = 16 \sqrt[4]{\frac{83,3 \cdot 1,4 \cdot 5,61 \cdot 0,95}{50 \cdot 5,32 \cdot 1,43^2 \cdot 0,856^2}} = 17,88 \text{ см.}$$

Принимаем ближайший больший размер $d = 18$ см из нормализованного ряда (§ 2-2). Уточняем по (3-68)

$$\beta = 1,4 \left(\frac{18,0}{17,88} \right)^4 = 1,43.$$

Средний диаметр двух обмоток находим по § 3-5 и (3-33):

$$d_{12} = 1,75 \cdot 18 = 31,5 \text{ см.}$$

Высота обмотки ориентировочно по (3-72)

$$l = \frac{\pi \cdot 31,5}{1,43} = 69,2 \approx 69 \text{ см.}$$

Полное сечение стержня по табл. 8-2 $P_{\text{ф.с}} = 232,8 \text{ см}^2$; активное сечение $P_c = 0,93 \cdot 232,8 = 216 \text{ см}^2$.

Расчет обмотки НН (по § 6-1)

Электродвижущая сила одного витка

$$u_{\text{в}} = 4,44 \cdot 50 \cdot 216 \cdot 1,43 \cdot 10^{-4} = 6,85 \text{ В.}$$

Число витков обмотки НН $w_1 = 231/6,85 = 33,7 = 34$, т. е.

$$u_{\text{в}} = \frac{231}{34} = 6,8 \text{ В.}$$

Средняя плотность тока в обмотках по формуле (3-49') при $k_d = 0,92$ по табл. 3-6

$$\Delta = 0,95 \cdot 0,463 \cdot 0,92 \frac{3500 \cdot 68}{250 \cdot 31,5} = 1,22 \text{ А/мм}^2,$$

Для обмотки НН принимаем $\Delta \approx 1,1$ А/мм².
Ориентировочное сечение витка

$$P_1' = \frac{361}{1,1} = 328 \text{ мм}^2.$$

По табл. 5-8 с учетом замечаний, сделанных в § 5-7, для заданных параметров $S=250$ кВ·А; $I=361$ А; $U_{н1}=0,4$ кВ; $P_1'=328$ мм² выбираем конструкцию двухслойной цилиндрической обмотки из прямоугольного провода марки АПСД. Число витков в слое $w_{сл1}=34/2=17$.

Ориентировочная высота витка

$$h_{в1} = \frac{69}{17+1} = 3,84 \text{ см.}$$

По табл. 5-3 выбираем пять прямоугольных алюминиевых проводов размерами $5 \times \frac{7,0 \times 9,3}{7,4 \times 9,7}$ с изоляцией из стекловолокна марки АПСД, намотка на ребро, левая. Сечение витка $P_1=5 \cdot 64,2=321$ мм²; плотность тока $\Delta=361/321=1,125$ А/мм²; высота витка $h_v=5 \cdot 0,74=3,7$ см. Выбранные размеры провода проверяем по добавочным потерям по табл. 5-9. Для размера 0,93 см добавочные потери при двух слоях менее 10%.

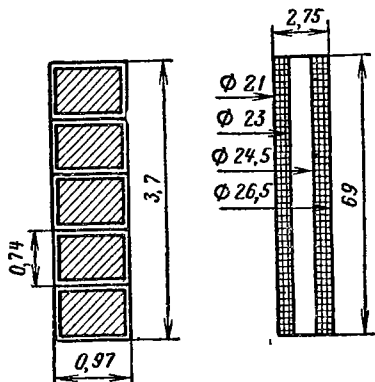


Рис. 10-1. Основные размеры обмотки НН трансформатора ТСЗ-250/10.

Радиальный размер провода проверяем также по плотности теплового потока на поверхности обмотки по (7-17')

$$q_1 = \frac{172}{0,75} \cdot 0,93 \frac{0,70}{0,74} \cdot 1,125^2 \cdot 1,07 = 273 \text{ Вт/м}^2,$$

что ниже допустимого для внутренних обмоток значения 280 Вт/м².
Осевой размер обмотки НН

$$l_1 = (17+1) \cdot 0,74 \cdot 5 + 2,5 = 69 \text{ см.}$$

Радиальный размер обмотки

$$a_1 = 2 \cdot 0,97 + 0,8 = 2,74 \text{ см} \approx 2,75 \text{ см,}$$

где осевой зазор между двумя слоями обмотки 0,8 см принят по табл. 9-2 для класса изоляции В для $230 < q < 450$ Вт/м².

Внутренний диаметр $D_1' = 18 + 2 \cdot 1,5 = 21$ см.

Наружный диаметр $D_1'' = 21 + 2 \cdot 2,75 = 26,5$ см.

Основные размеры обмотки показаны на рис. 10-1.

Масса металла обмотки

$$G_{\text{от}} = 8,47 \cdot 3 \cdot 23,75 \cdot 34 \cdot 321 \cdot 10^{-5} = 65,6 \text{ кг.}$$

По табл. 5-5 находим увеличение массы провода за счет изоляции марки АПСД (толщина изоляции на две стороны 0,4 мм, алюминий) $1,5 \cdot 1,7 \cdot 3,3 = 8,4\%$. Масса провода обмотки

$$G_{\text{пр}} = 65,6 \cdot 1,084 = 71 \text{ кг.}$$

Расчет обмотки ВН (по § 6-3)

Выбираем схему регулирования по типу представленной на рис. 6-6, б. Регулировочные ответвления выводятся на доску зажимов. Регулирование напряжения без возбуждения (ПВВ) производится после отключения трансформатора от сети и от нагрузки, путем

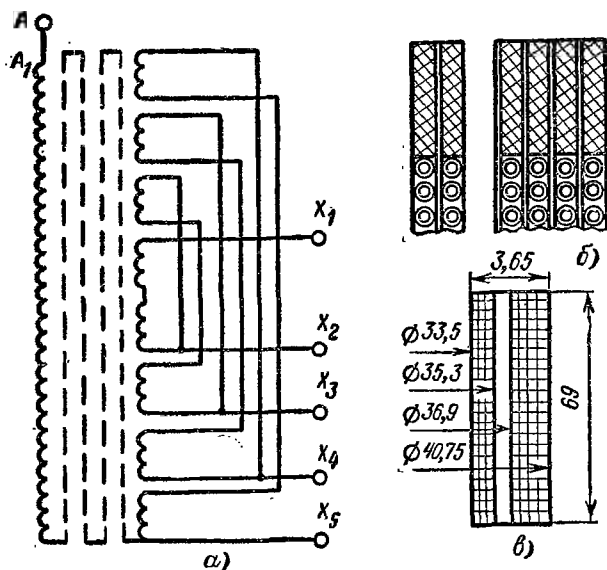


Рис. 10-2. Обмотка ВН трансформатора ТСЗ-250/10.

а — схема ответвлений; б — структура концевой и междуслойной изоляции; в — основные размеры обмотки.

перестановки соединяющей пластины (рис. 10-2). Зажимы рассчитываются на рабочий ток 14,4 А. Наибольшее напряжение между зажимами двух фаз:

рабочее 10% 1000 В

испытательное 20% 2000 В

Для получения на стороне ВН различных напряжений необходимо соединить:

9500 В . . . $x_5 y_5 z_5$ 10 250 В . . . $x_2 y_2 z_2$

9750 В . . . $x_4 y_4 z_4$ 10 500 В . . . $x_1 y_1 z_1$

10000 В . . . $x_3 y_3 z_3$

Число витков обмотки ВН при номинальном напряжении :

$$w_{H2} = 34 \frac{10\,000}{400} = 850.$$

Число витков ВН на одной ступени регулирования

$$w_{p2} = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 6,8} = 21,2 \approx 21.$$

Числа витков на ответвлениях:

Ступень 10 500 В $w_2 = 850 + 2 \cdot 21 = 892$

Ступень 10 250 В $w = 850 + 21 = 871$

Ступень 10 000 В $w_{H2} = 850$

Ступень 9750 В $w = 850 - 21 = 829$

Ступень 9500 В $w = 850 - 2 \cdot 21 = 808$

Ориентировочная плотность тока

$$\Delta'_2 = 2 \cdot 1,19 - 1,125 = 1,255 \text{ А/мм}^2.$$

Ориентировочное сечение витка $P_2 = \frac{14,4}{1,255} = 11,5 \text{ мм}^2$. По табл. 5-8 по известным параметрам обмотки ($S=250 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; $I_2 = 14,4 \text{ А}$; $U_2=10 \text{ кВ}$; $P_2 \approx 11,5 \text{ мм}^2$) выбираем конструкцию многослойной цилиндрической обмотки из круглого провода. По табл. 5-1 выбираем алюминиевый круглый провод марки АПСД диаметром 3,8/4,2 мм с сечением $P_2=11,34 \text{ мм}^2$ и плотностью тока $\Delta = 14,4/11,34 = 1,27 \text{ А/мм}^2$.

Число витков в слое обмотки $w_{\text{сл}} = (69/0,42) - 1 = 163$.

Число слоев $n_{\text{сл}} = 892/163 = 5,5 \approx 6$.

Напряжение двух слоев $U_{\text{мол}} = 6,8 \cdot 2 \cdot 163 = 2220 \text{ В}$. Согласно § 4-6 принимаем междуслойную изоляцию из стеклолакоткани марки ЛСБ — четыре слоя по 0,15 мм. Выступ изоляции за конец слоя витков — 2,0 см (§ 4-6). Распределение витков по слоям:

четыре слоя по 163 витка = 652

один слой 156 витков = 156

один слой 84 витка = 84

Всего 892 витка

Между вторым и третьим слоями канал 0,8 см. Витки пятого слоя располагаются по середине высоты слоя. Витки шестого слоя располагаются по рис. 10-2, а; основные размеры обмотки ВН — по рис. 10-2, в. Обмотка наматывается на рейках на жестком бумажно-бакелитовом цилиндре с размерами $\varnothing 29,5/30,5 \times 76$ см.

Радиальный размер обмотки

$$a_2 = 2 \cdot 0,42 + 1 \cdot 4 \cdot 0,015 + 0,8 + \\ + 4 \cdot 0,42 + 4 \cdot 4 \cdot 0,015 = 3,62 \text{ см.}$$

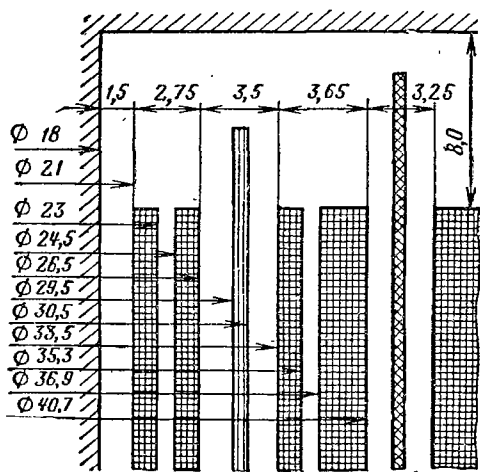


Рис. 10-3. Радиальное строение обмоток трансформатора ТСЗ-250/10. Размеры в сантиметрах.

Внутренний диаметр обмотки

$$D'_2 = 26,5 + 2 \cdot 3,5 = 33,5 \text{ см.}$$

Наружный диаметр $D''_2 = 33,5 + 2 \cdot 3,62 = 40,74 \text{ см.}$

Поверхность охлаждения обмотки

$$P_{o2} = 2\pi \cdot 3 \cdot 0,75 (33,5 + 40,74) \cdot 69 \cdot 10^{-4} = 7,25 \text{ м}^2.$$

Масса металла обмотки

$$G_{o2} = 8,47 \cdot 3 \cdot \frac{33,5 + 40,74}{2} \cdot 892 \cdot 11,34 \cdot 10^{-5} = 95,4 \text{ кг.}$$

Масса провода обмотки (табл. 5-1). Увеличение массы $1,5 \times 2,1 \times \times 3,3 = 10,4\%$

$$G_{пр2} = 95,4 \cdot 1,104 = 105,6 \text{ кг.}$$

Общая масса металла обмоток $G_o = 65,6 + 95,4 = 161 \text{ кг}$; общая масса провода $G_{пр} = 70 + 105,6 = 175,6 \text{ кг}$. Основные размеры обмоток показаны на рис. 10-3.

Расчет параметров короткого замыкания

Потери короткого замыкания (по § 7-1). Основные потери по (7-4):
обмотка НН

$$P_{\text{осн1}} = 12,75 \cdot 1,125^2 \cdot 65,9 = 1060 \text{ Вт}$$

обмотка ВН

$$P_{\text{осн2}} = 12,75 \cdot 1,27^2 \cdot 95,4 \frac{1,00}{1,05} = 1870 \text{ Вт.}$$

Добавочные потери в обмотке НН по (7-15)

$$k_{\text{д1}} = 1 + 0,037 \cdot 0,67 \cdot 0,93^4 (2^2 - 0,2) = 1,07$$

$$\beta_1^2 = \left(\frac{5 \cdot 0,7 \cdot 17}{69} \cdot 0,95 \right)^2 = 0,67.$$

Добавочные потери в обмотке ВН по (7-15'')

$$k_{\text{д2}} = 1 + 0,017 \cdot 0,73 \cdot 0,38^4 \cdot 6^2 = 1,0092 \approx 1,01$$

$$\beta_2^2 = \left(\frac{0,38 \cdot 163}{69} \cdot 0,95 \right)^2 = 0,73.$$

Потери в отводах НН. Длина отводов приближенно по (7-21)

$$l_{\text{отв1}} \approx 7,5 \cdot 69 = 516 \text{ см}$$

масса металла

$$G_{\text{отв1}} \approx 516 \cdot 321 \cdot 2,7 \cdot 10^{-5} = 4,46 \text{ кг} \approx 4,5 \text{ кг.}$$

Потери в отводах НН $P_{\text{отв1}} = 12,75 \cdot 1,125^2 \cdot 4,5 = 73 \text{ Вт}$. Потерями в отводах ВН пренебрегаем.

Полные потери короткого замыкания

$$P_{\text{к}} = 1060 \cdot 1,07 + 1870 \cdot 1,01 + 73 = 3096 \text{ Вт,}$$

что на $\frac{3500 - 3096}{3500} \cdot 100 = 11,5\%$ ниже заданной нормы.

Плотность теплового потока на поверхности обмоток НН $q_1 = 273 \text{ Вт/м}^2$; ВН $q_2 = \frac{1870 \cdot 1,01}{7,25} = 260 \text{ Вт/м}^2$.

Расчет напряжения короткого замыкания (по § 7-2).
Активная составляющая

$$u_a = \frac{3096}{10 \cdot 250} = 1,24\%.$$

Реактивная составляющая

$$u_p = \frac{7,92 \cdot 50 \cdot 83,3 \cdot 5,62 \cdot 1,365 \cdot 0,954}{6,8^2} \cdot 10^{-3} = 5,20\%$$

$$a_p = 3,5 + \frac{2,75 + 3,62}{3} = 5,62 \text{ см}; \quad \beta = \frac{\pi \cdot 30}{69} = 1,365;$$

$$\sigma = \frac{2,75 + 3,5 + 3,62}{\pi \cdot 69} = 0,0465;$$

$$k_p = 1 - 0,0465 (1 - e^{-1/0,0465}) = 0,954.$$

Напряжение короткого замыкания

$$u_k = \sqrt{5,2^2 + 1,24^2} = 5,35\%,$$

что на $\frac{5,5 - 5,35}{5,5} 100 = 2,7\%$ меньше заданного при допуске $\pm 5\%$.

Расчет механических сил при коротком замыкании (по § 7-3)

Ток короткого замыкания:
установившийся

$$I_{к-у} = 361 \frac{100}{5,35} = 6750 \text{ А};$$

мгновенный максимальный

$$I_{к-м} = 1,41 \cdot 1,473 \cdot 6750 = 14\,000 \text{ А};$$

$$k_m = 1 + e^{-\pi 1,24/5,2} = 1,473.$$

Радиальная сила

$$F_p = 0,628 (14\,000 \cdot 34)^2 1,365 \cdot 0,954 \cdot 10^{-6} = 185\,300 \text{ Н}.$$

Растягивающее напряжение в проводе обмотки ВН

$$\sigma_p = \frac{185\,300}{2\pi \cdot 850 \cdot 11,34} = 3,06 \text{ МПа},$$

что значительно ниже допустимого для алюминиевого провода

$$\sigma_{p, \text{доп}} = 22 \div 25 \text{ МПа}.$$

Полная осевая сила по (7-51)

$$F_{ос} = 7,50 \cdot 30 \left(3,5 + \frac{2,75 + 3,65}{2} \right) (14\,000 \cdot 34)^2 \times \\ \times \frac{1}{69^2} \cdot 0,36 \cdot 10^{-6} = 25\,830 \text{ Н},$$

где

$$K = \Delta_1 k_{01} + \Delta_2 k_{02} = 2,18 \cdot 0,165 + 16,7 \cdot 0 = 0,361$$

$$\Delta_1 = \frac{1,5}{69} 100 = 2,18\% \text{ по табл. 7-3;}$$

$$k_{01} = 0,33 - 1,15 \frac{a_0}{l} = 0,33 - 1,15 \frac{9,90}{69} = 0,165 \text{ по (7-53);}$$

$$a_0 = 3,5 + 2,75 + 3,65 = 9,90 \text{ см; } k_{02} = 0;$$

$$\Delta_2 = \frac{1}{n} 100 = \frac{1}{6} 100 = 16,7\%.$$

Давление на ярмовую изоляцию — 6 опорных брусков по 4 см шириной при площади опоры обмотки НН по рис. 10-1

$$2 \cdot 0,97 \cdot 6 \cdot 4 = 46,5 \text{ см}^2 = 4650 \text{ мм}^2$$

$$\text{Напряжение сжатия } \sigma_{сж} = \frac{25830}{4650} = 5,55 \text{ МПа.}$$

Расчет магнитной системы трансформатора

Определение размеров и массы стали магнитной системы (по § 8-1).

Выбираем конструкцию плоской трехфазной стержневой шихтованной магнитной системы, собираемой из пластин холоднокатаной текстурованной стали со стыками по рис. 10-4, б. Стержень прессуется расклиниванием с обмоткой, ярмо — ярмовыми балками. Размеры пакетов — по рис. 10-4, а (табл. 8-1). В сечении стержня шесть ступеней, сечение ярма повторяет сечение стержня, в котором объединяются два крайних пакета.

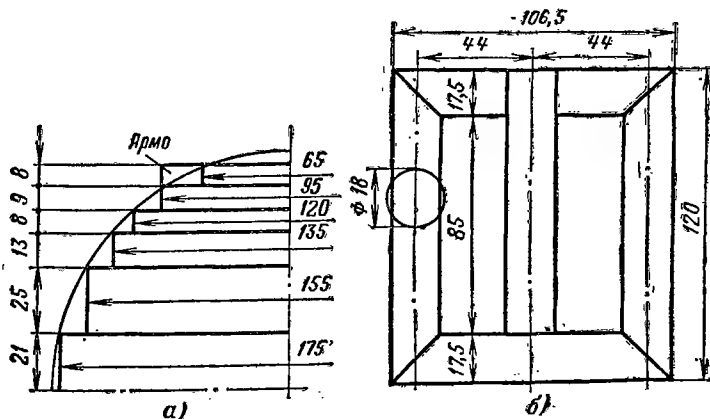


Рис. 10-4. Размеры магнитной системы трансформатора ТСЗ-250/10.
а — сечение стержня и ярма (размеры в миллиметрах); б — основные размеры магнитной системы (размеры в сантиметрах).

Сечения пакетов в половине сечения стержня

$$17,5 \cdot 2,1 + 15,5 \cdot 2,5 + 13,5 \cdot 1,3 + 12,0 \cdot 0,8 + 9,5 \cdot 0,9 + \\ + 6,5 \cdot 0,8 = 116,4 \text{ см}^2.$$

Общая толщина пакетов в половине сечения стержня

$$2,1 + 2,5 + 1,3 + 0,8 + 0,9 + 0,8 = 8,4 \text{ см.}$$

Полное сечение $P_{\phi,с} = 116,4 \cdot 2 = 232,8 \text{ см}^2$.

Активное сечение $P_c = 0,93 \cdot 232,8 = 216,5 \text{ см}^2$.

Сечения пакетов в половине сечения ярма

$$17,5 \cdot 2,1 + 15,5 \cdot 2,5 + 13,5 \cdot 1,3 + 12,0 \cdot 0,8 + 9,5 \cdot 1,7 = \\ = 36,75 + 38,75 + 17,55 + 9,6 + 16,15 = 118,8 \text{ см}^2.$$

Полное сечение $P_{\phi,я} = 118,8 \cdot 2 = 237,6 \text{ см}^2$.

Активное сечение $P_{я} = 0,93 \cdot 237,6 = 221 \text{ см}^2$.

Ширина ярма $b_{я} = 2 \cdot 8,4 = 16,8 \text{ см.}$

Длина стержня $l_c = 69 + 2 \cdot 8 = 85 \text{ см.}$

Расстояние между осями соседних стержней

$$C = 40,74 + 3,0 = 43,74 \approx 44 \text{ см.}$$

Масса стали в ярах по (8-13), (8-11) и (8-15)

$$G'_{я} = 2 \cdot 2 \cdot 44 \cdot 221 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} = 298 \text{ кг};$$

$$2G_y = 2 \cdot 2 \cdot 0,93 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} (17,5 \cdot 17,5 \cdot 2,1 + 15,5 \cdot 15,5 \cdot 2,5 + \\ + 13,5 \cdot 13,5 \cdot 1,3 + 12 \cdot 12 \cdot 0,8 + 9,5 \cdot 9,5 \cdot 0,9 + \\ + 9,5 \cdot 6,5 \cdot 0,8) = 2 \cdot 24,6 = 49,2 \text{ кг};$$

$$G_{я} = G'_{я} + 2G_y = 298 + 49,2 = 347,2 \text{ кг.}$$

Масса стали в стержнях по (8-17), (8-18) и (8-16)

$$G'_c = 3 \cdot 216,5 \cdot 85 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} = 422 \text{ кг};$$

$$G''_c = 3 (216,5 \cdot 17,5 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} - 24,6) = 13,2 \text{ кг};$$

$$G_c = G'_c + G''_c = 422 + 13,2 = 435,2 \text{ кг.}$$

Расчет потерь холостого хода (по § 8-2)

Магнитная система собирается из электротехнической тонколистовой рулонной холоднокатаной стали марки Э330А-0,35 по ГОСТ 802-58.

Индукция в стержне

$$B_c = \frac{6,8 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 216,5} = 1,415 \text{ Тл}$$

индукция в ярме

$$B_{\text{я}} = \frac{6,8 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 221} = 1,39 \text{ Т.}$$

Индукция в косом стыке

$$B_{\text{ст}} = 1,415 / \sqrt{2} = 1,00 \text{ Т.}$$

Для рассчитанных индукций по табл. 8-4 находятся удельные потери: $p_c = 0,967 \text{ Вт/кг}$; $p_{\text{я}} = 0,933 \text{ Вт/кг}$; $p_{\text{з.с}} = 0,059 \text{ Вт/см}^2$; $p_{\text{з.я}} = 0,056 \text{ Вт/см}^2$; $p_{\text{з.ст}} = 0,019 \text{ Вт/см}^2$.

Потери холостого хода определяются по формуле (8-31), в которой принимаются: $k_{\text{п.я}} = 1,0$; $k_{\text{п.ш}} = 1,02$; $k_{\text{п.п}} = 1,02$; $k_{\text{п.з}} = 1,0$; $k_{\text{п.р}} = 1,0$; $k_{\text{у.п}} = 8,92$ по табл. 8-6.

$$P_{\text{х}} = 1,0 \cdot 1,02 \cdot 1,02 \cdot 1,0 \cdot 1,0 [0,967 \cdot 435,2 + 0,933 (298 - 4 \cdot 24,6) + 0,950 \cdot 24,6 \cdot 8,92 + 0,019 \cdot 4 \cdot \sqrt{2} \cdot 216,5 + 0,059 \cdot 1 \cdot 216,5 + 0,056 \cdot 2 \cdot 221] = 911 \text{ Вт,}$$

что на $\frac{911 - 920}{920} = -1\%$ ниже заданного значения.

Расчет тока холостого хода (по § 8-3)

По табл. 8-11 находятся удельные намагничивающие мощности: $q_c = 1,68 \text{ В} \cdot \text{А/кг}$; $q_{\text{я}} = 1,62 \text{ В} \cdot \text{А/кг}$; $q_{\text{з.с}} = 1,31 \text{ В} \cdot \text{А/см}^2$; $q_{\text{з.я}} = 1,15 \text{ В} \cdot \text{А/см}^2$; $q_{\text{з.ст}} = 0,06 \text{ В} \cdot \text{А/см}^2$.

Для принятой конструкции и технологии изготовления магнитной системы с восстановительным отжигом пластины применим формулу (8-43), в которой примем коэффициенты: $k_{\text{т.я}} = 1,0$; $k_{\text{т.ш}} = 1,02$; $k_{\text{т.п}} = 1,04$; $k_{\text{т.з}} = 1,10$; $k_{\text{т.р}} = 1,00$; $k_{\text{т.у}} = 2,20$ (по табл. 8-10); $k_{\text{т.у}}'' = 3,85$ (по табл. 8-10); $k_{\text{у.т}} = 16,50$ (по табл. 8-12).

$$Q_{\text{х}} = 1,0 \cdot 1,02 \cdot 1,04 (1,10 \cdot 1,00 [1,68 \cdot 435,2 + 1,62 (298 - 4 \cdot 24,6) + 1,66 \cdot 24,6 \cdot 16,5] + 0,60 \cdot 4 \cdot \sqrt{2} \cdot 216,5 + 1,31 \cdot 1 \cdot 216,5 + 1,31 \cdot 2 \cdot 221) = 3696 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

Ток холостого хода. Активная составляющая $i_{0\text{а}} = \frac{911}{10,250} = 0,366\%$.

Реактивная составляющая $i_{0\text{р}} = \frac{3696}{10 \cdot 250} = 1,48\%$.

Ток холостого хода $i_0 = \sqrt{1,48^2 + 0,366^2} = 1,52\%$.

**10-2. ПРИМЕР РАСЧЕТА ТРЕХФАЗНОГО ДВУХОБОМОТОЧНОГО
ТРАНСФОРМАТОРА ТИПА ТРДН-25000/110,
25 000 КВ·А, РПН, С МАСЛЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ И ДУТЬЕМ**

Задание на расчет трансформатора

Рассчитать трехфазный понижающий трансформатор со следующими данными:

Номинальная мощность $S=25\,000$ кВ·А.

Обмотка НН расщеплена по мощности на две группы, мощность каждой группы 12 500 кВ·А.

Число фаз $m=3$; частота $f=50$ Гц.

Напряжение ВН: $U_1 = 115\,000 \pm 9 \times 1,778\% \text{ В (РПН)}$.

Напряжение НН: $U_2=6300$ В (каждой группы).

Схема и группа соединения Y_H/Δ - Δ -11-11.

Способ охлаждения — естественное масляное с дутьем.

Характер нагрузки — длительная.

Установка Наружная.

Регулирование напряжения под нагрузкой (РПН) на стороне ВН осуществляется в нейтральной обмотке при помощи переключателя с активными токоограничивающими сопротивлениями (рис. 6-7, в). Принципиальная схема регулирования приведена на рис. 10-5.

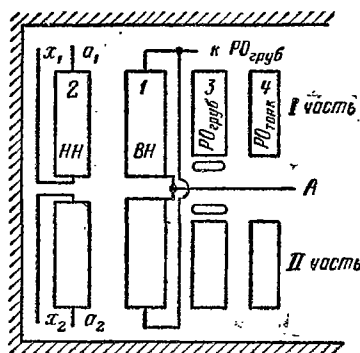
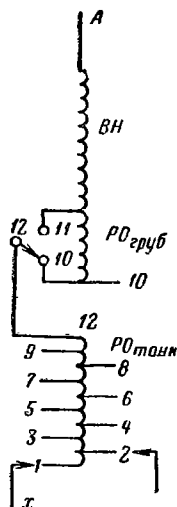


Рис. 10-6. Трансформатор ТРДН-25000/110. Схема расположения обмоток на стержне трансформатора.

Рис. 10-5. Трансформатор ТРДН-25000/110.
 ◀ Схема регулирования напряжения на обмотке ВН.

Положение реверсора	12—10	12—10	12—11
Рабочий контакт в положении . . .	1	10	9
Включено витков	макс	ном	мин

Обмотка ВН состоит из трех коцентрически расположенных обмоток: главной обмотки ВН, обмотки грубого регулирования $PO_{\text{груб}}$ и обмотки тонкого регулирования $PO_{\text{тонк}}$. Порядок расположения обмоток от стержня наружу: НН—ВН— $PO_{\text{груб}}$ — $PO_{\text{тонк}}$ (рис. 10-6).

Напряжение и потери короткого замыкания (на основном отвлении) $u_k=10,5\%$, P_k не более 120 000 Вт.

Потери холостого хода не более $P_x=36\ 000$ Вт.

Ток холостого хода не более $i_0=0,8\%$.

Расчет исходных данных расчета

Расчет проводится для трехфазного трансформатора, с плоской магнитной системой, стержневого типа с коцентрическими обмотками.

Определение основных электрических величин по § 3-2.

Мощность одной фазы и одного стержня

$$S_{\phi} = S' = \frac{25\ 000}{3} = 8333 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Номинальные токи:
на стороне ВН

$$I_1 = \frac{25\ 000 \cdot 10^3}{\sqrt{3 \cdot 115\ 000}} = 125,5 \text{ А}$$

на стороне НН (каждой группы)

$$I_2 = \frac{25\ 000 \cdot 10^3}{2 \cdot \sqrt{3 \cdot 6300}} = 1145 \text{ А}.$$

При параллельном соединении двух групп расщепленной обмотки НН мощность трансформатора составляет 25 000 кВ·А. Каждая группа может работать на изолированную систему мощностью 12 500 кВ·А. Обмотки расположены на стержне по рис. 10-6.

Фазные токи:

$$\text{ВН } I_{\phi 1} = 125,5 \text{ А}; \quad \text{НН (группы) } I_{\phi 2} = \frac{1145}{\sqrt{3}} = 661,4 \text{ А}.$$

Фазные напряжения

$$\text{ВН } U_{\phi 1} = \frac{115\ 000}{\sqrt{3}} = 66\ 397 \text{ В};$$

НН $U_{\phi 2}=6300$ В.

Испытательные напряжения обмоток (табл. 4-1). Обмотка ВН имеет регулировочные ответвления, расположенные вблизи нейтрали.

Испытательные напряжения: линейного конца обмотки ВН $U_{\text{испл}}=200$ кВ; нейтрального конца обмотки ВН $U_{\text{исплн}}=100$ кВ; обмотки НН $U_{\text{испл2}}=25$ кВ.

Выбор исходных данных расчета:

1. Мощность обмоток одного стержня $S' = 8333 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

2. Ширина приведенного канала рассеяния для $U_{испл} = 200 \text{ кВ}$
 $a_{12} = 5,0 \text{ см}$ (рис. 4-8); по (3-28) и табл. 3-3

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = 0,6 \cdot \sqrt[4]{8333 \cdot 0,9} = 5,16 \text{ см};$$

коэффициент 0,9 введен с учетом того, что по принятой схеме регулирования в главной части обмотки ВН число витков составляет примерно 82% номинального;

$$a_p = 5,0 + 5,16 = 10,16 \text{ см}.$$

3. Коэффициент приведения реального поля рассеяния к идеальному полю принимаем

$$k_p = 0,95.$$

4. Частота $f = 50 \text{ Гц}$.

5. Активная составляющая напряжения короткого замыкания

$$u_a = \frac{120\,000}{10 \cdot 25\,000} = 0,48\%.$$

Реактивная составляющая

$$u_p = \sqrt{10,5^2 - 0,48^2} \approx 10,48\%.$$

6. Согласно указаниям § 2-2 выбираем плоскую трехфазную стержневую шихтованную магнитную систему по рис. 2-6, *д* с косыми стыками на крайних стержнях и прямыми на среднем стержне — по рис. 2-18, *а*. Прессовка стержней баидажами из стеклоленты — по рис. 2-14, *б* и ярм — стальными балками и стальными полубаидажами — по рис. 2-15, *б*. Материал магнитной системы — холоднокатаная текстурованная рулонная сталь марки Э330А толщиной 0,35 мм, ценой 0,456 руб/кг. Индукция в стержне $B_c = 1,54 \text{ Т}$ (по табл. 2-9). В сечении стержня 15 ступеней, коэффициент заполнения круга $k_{кр} = 0,925$ (табл. 2-1); изоляция пластин — жаростойкое покрытие (без лакировки) $k_s = 0,95$ (табл. 2-6), $k_c = k_{кр} k_s = 0,925 \times 0,95 = 0,879$. Ярмо многоступенчатое, число ступеней 12, коэффициент усиления ярма $k_y = 1,01$ (табл. 8-1, 8-2). Индукция в ярме $B_y = B_c \frac{1}{1,01} = 1,525 \text{ Т}$. Число зазоров в магнитной системе на косом стыке 4, на прямом 3. Индукция в зазоре на прямом стыке $B_z'' = B_c = 1,54 \text{ Т}$; на косом стыке

$$B_z' = \frac{B_c}{\sqrt{2}} = \frac{1,54}{\sqrt{2}} = 1,09 \text{ Т}.$$

Удельные потери в стали: $p_c = 1,18 \text{ Вт/кг}$; $p_y = 1,15 \text{ Вт/кг}$. Удельные намагничивающие мощности: $q_c = 2,23 \text{ В} \cdot \text{А/кг}$; $q_y = 2,13 \text{ В} \cdot \text{А/кг}$; для зазоров прямых стыков $q_z'' = 2,35 \text{ В} \cdot \text{А/см}^2$, для зазоров косых стыков $q_z' = 0,105 \text{ В} \cdot \text{А/см}^2$.

7. Изоляционные расстояния. Между обмоткой НН и стержнем

$$a_{02} = 1,7 \text{ см} (U_{\text{исп}2} = 25 \text{ кВ, табл. 4-4}).$$

С учетом размещения в этом канале внутренних отводов расщепленной обмотки НН (примерно 2,5 см) принимаем

$$a_{02} = 4,0 \text{ см.}$$

Остальные изоляционные расстояния по рис. 4-8.

Между обмотками НН и ВН

$$a_{12} = 5,0 \text{ см} (U_{\text{исп}1\text{л}} = 200 \text{ кВ}).$$

Между обмотками ВН и $PO_{\text{груб}}$

$$a_{13} = 5,0 \text{ см} (U_{\text{исп}1\text{л}} = 200 \text{ кВ}).$$

Между обмотками $PO_{\text{груб}}$ и $PO_{\text{тонк}}$

$$a_{34} = 2,7 \text{ см} (U_{\text{исп}1\text{н}} = 100 \text{ кВ}).$$

Между обмотками $PO_{\text{тонк}}$ соседних фаз

$$a_{44} = 3,5 \text{ см.}$$

Расстояние обмоток ВН от нижнего ярма $l_0' = 7,5 \text{ см} \approx 8,0 \text{ см.}$

От верхнего ярма при наличии нажимного кольца $l_0'' = 7,5 + 2,5 + 3,0 = 13 \text{ см}$ (рис. 4-8)

$$l = \frac{8,0 + 13,0}{2} = 10,5 \text{ см.}$$

8. Находим постоянные коэффициенты

$a = 1,45$ (табл. 3-4), коэффициент принят несколько выше данных в таблице в связи с выполнением обмотки ВН в виде трех концентраторов по схеме рис. 10-6. С учетом этого расчет проводим аналогично трехобмоточному трансформатору, для которого в соответствии с принятыми обозначениями

$$C = d_{12} + a_{12} + 2a_1 + 2a_{13} + 2a_3 + a_{33} \text{ (рис. 3-7),}$$

где $b_1 = 2a_1/d$; $b_3 = 2a_3/d$, причем $a_3 = a_{\text{р.о.груб}} + a_{\text{р.о.тонк}}$ (суммарный радиальный размер обмоток грубого и тонкого регулирования);

$$a_{23} = a_{13} + a_{34} = 5,0 + 2,7 = 7,7 \text{ см;}$$

$b_1 = 0,9 \cdot 0,33 = 0,297$ (табл. 3-5), коэффициент 0,9 учитывает, что в главной части обмотки ВН заложено 82% номинального числа витков;

$b_3 = 0,5 \cdot 0,33 = 0,165$ (табл. 3-5), коэффициент 0,5 учитывает, что в регулировочной части обмотки ВН заложено примерно 32% номинального числа витков;

$$a_{33} = 3,5 \text{ см (рис. 4-8); } k_d = 0,84 \text{ (табл. 3-6).}$$

Определяем

$$k_{\text{к.з}} = 1,41 \frac{100}{10,48} (1 + e^{-0,48/10,48}) = 26,8.$$

Дальнейший расчет проводим по § 3-4 и 3-5. По формулам (3-30), (3-35), (3-36), (3-43), (3-44), (3-52) и (3-65) находим коэффициенты

$$A = 16 \sqrt[4]{\frac{8333 \cdot 10,16 \cdot 0,95}{50 \cdot 10,48 \cdot 1,54^2 \cdot 0,879^2}} = 48,4;$$

$$A_1 = 5,66 \cdot 10^{-2} \cdot 1,45 \cdot 48,4^3 \cdot 0,879 = 8200 \text{ кг};$$

$$A_2 = 3,60 \cdot 10^{-2} \cdot 48,4^2 \cdot 0,879 \cdot 10,5 = 779 \text{ кг};$$

$$B_1 = 2,40 \cdot 10^{-2} \cdot 0,879 \cdot 1,01 \cdot 48,4^3 (1,45 + 0,297 + \\ + 0,165 + 0,411) = 5630 \text{ кг};$$

$$B_2 = 2,40 \cdot 10^{-2} \cdot 0,879 \cdot 1,01 \cdot 48,4^2 \cdot (5,0 + 2,7,7 + 3,5) = 1197 \text{ кг};$$

$$C_1 = 2,46^2 \cdot 10^2 \frac{25\,000 \cdot 1,45^2}{0,84 \cdot 0,879^2 \cdot 1,54^2 \cdot 0,48 \cdot 48,4^2} = 7480 \text{ кг};$$

$$M = 0,2453 \cdot 10^{-4} \cdot 26,8^2 \cdot 0,84 \cdot 0,95 \frac{120\,000}{1,45 \cdot 48,4} = 24,2 \text{ МПа}.$$

Минимальная стоимость активной части трансформатора имеет место при условиях, определяемых уравнением (3-55). Для рассчитываемого трансформатора:

$$B = \frac{2}{3} \frac{779 + 1197}{5630} = 0,234; k_{0.8} = 2,7 \text{ (табл 3-7)};$$

$$C = \frac{8200}{3 \cdot 5630} = 0,487; k_{и.р} = 1,06;$$

$$D = \frac{2}{3} \frac{7480}{5630} 2,7 \cdot 1,06 = 2,54;$$

$$x^5 + 0,234x^4 - 0,487x - 2,54 = 0.$$

Решение этого уравнения дает $\beta = 1,8$, соответствующее минимальному $C_{a.ч}$.

По (3-61) и (3-66) находим предельные значения β по допустимым значениям плотности тока Δ и растягивающим механическим напряжениям σ_r :

$$x_{\Delta} \leq 4,5 \sqrt{\frac{2,4 \cdot 7480}{0,84 \cdot 120\,000}} = 1,90; \beta = x^4 = 12,96;$$

$$x_{\sigma} \leq \sqrt[3]{\frac{60}{24,20}} = 1,358; \beta = 1,358^4 = 3,36.$$

Оба полученных значения β лежат за пределами обычно применяемых значений.

Масса одного угла магнитной системы по (3-45)

$$G_y = 0,493 \cdot 10^{-2} \cdot 0,879 \cdot 1,01 \cdot 48,4^3 \cdot x^3 = 497x^3.$$

Активное сечение стержня по (3-59)

$$P_a = 0,785k_c A^2 x^2 = 0,785 \cdot 0,879 \cdot 48,4^2 x^2 = 1617x^2.$$

Площадь зазора на прямом стыке $\Pi'_3 = \Pi_c = 1617 x^2$; на косом стыке $\Pi'_8 = \Pi_c \sqrt{2} = 2280x^2$.

Потери холостого хода по формуле (8-32):

$$\begin{aligned} P_x &= k_{п.д} p_0 \left(G_c + G_y \frac{k_{y.п}}{2} \right) + k_{п.д} p_{я} \left[G_{я} - (k_{\phi} + 2) G_y + \frac{k_{y.п}}{2} G_y \right] = \\ &= 1,08 \cdot 1,18 \left(G_c + G_y \frac{8,92}{2} \right) + 1,08 \cdot 1,15 \left(G_{я} - 6G_y + \frac{8,92}{2} G_y \right); \\ P_x &= 1,275G_c + 1,24G_{я} + 4,77G_y. \end{aligned}$$

Намагничивающая мощность по формуле (8-44)

$$\begin{aligned} Q_x &= k'_{т.д} k''_{т.д} q_0 \left(G_c + \frac{k_{y.т}}{2} G_y \right) + k'_{т.д} k''_{т.д} q_{я} \left[G_{я} - (k_{\phi} + \right. \\ &+ 2) G_y + \frac{k_{y.т}}{2} G_y \left. \right] + k'_{т.д} q_3 n_8 \Pi_8 = 1,21 \cdot 2,23 \left(G_c + \right. \\ &+ \frac{23,88}{2} G_y \left. \right) + 1,21 \cdot 2,23 \left(G_{я} - 6G_y + \frac{23,88}{2} G_y \right) + \\ &+ 1,1 (0,105 \cdot 4 \cdot 2280 + 2,35 \cdot 3 \cdot 1617) x^2; \\ Q_x &= 2,7G_c + 2,58G_{я} + 79,76G_y + 12360x^2. \end{aligned}$$

Далее определяются основные размеры трансформатора

$$d = Ax; d_{12} = aAx; l = \pi d_{12} / \beta;$$

$$2a_1 = b_1 d; 2a_3 = b_3 d;$$

$$C = d_{12} + a_{12} + 2a_1 + 2a_{13} + 2a_3 + a_{33}.$$

Весь дальнейший расчет, начиная с определения массы стали магнитной системы для шести различных значений β от 1,2 до 2,7, проводится в форме табл. 10-1.

На рис. 10-7 построены графики зависимости $P_x = f(\beta)$; $i_0 = f(\beta)$ и $C_{а.я} = f(\beta)$. По этим графикам выбираем значение $\beta = 1,8$, соответствующее стоимости, близкой к минимальной, при этом для выбранных исходных данных будут получены значения P_x и i_0 ниже заданных.

Т а б л и ц а 10-1

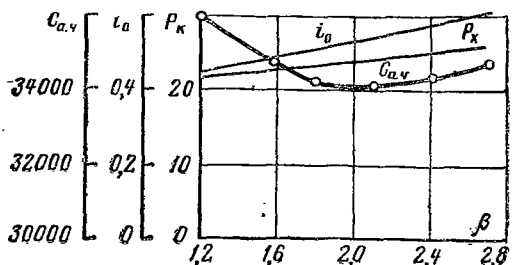
Предварительный расчет трансформатора ТРДН-25000/110 с плоской шихтованной магнитной системой
и медными обмотками

β	1,2	1,6	1,8	2,1	2,4	2,7
$x = \sqrt[4]{\beta}$	1,048	1,125	1,16	1,206	1,245	1,284
$x^2 = \sqrt[4]{\beta^2}$	1,096	1,265	1,344	1,45	1,55	1,646
$x^3 = \sqrt[4]{\beta^3}$	1,148	1,42	1,56	1,75	1,93	2,112
$A_1/x = 8200/x$ $A_2x^2 = 779 x^2$	7830 855	7280 985	7070 1050	6800 1130	6590 1210	6380 1282
$G_c = A_1/x + A_2x^2$	8685	8265	8120	7930	7800	7662
$B_1x^3 = 5630 x^3$ $B_2x^2 = 1197 x^2$	6450 1310	7990 1515	8780 1610	9850 1735	10890 1855	11900 1970
$G_{\text{я}} = B_1 x^3 + B_2 x^2$	7760	9505	10 390	11 588	12 745	13 870
$G_{\text{сг}} = G_c + G_{\text{я}}$	16 445	17 770	18 510	19 518	20 545	21 532

i	$G_y = 497 \ x^3$	670	706	775	870	960	1050
	1,275 G_o 1,24 G_a 4,776 G_y	11080 9620 3200	10530 11800 3380	10350 12880 3700	10100 14350 4150	9950 15800 14580	9750 17200 5020
	$P_x = 1,275 \ G_o + 1,24 \ G_a + 4,776 \ G_y$	22 900	25 710	26 930	28 600	30 330	31 970
	$P_o = 1617 \ x^2$	1770	2045	2175	2340	2505	2660
	2,7 G_o 2,58 G_a 79,7 G_y 12 360 x^2	23 500 20 100 53 500 13 550	22 400 24 600 56 400 15 650	22 000 26 800 61 800 16 600	21 400 29 900 69 500 17 900	21 100 32 900 76 500 19 200	20 800 35 800 83 600 20 350
	Q_x	110 650	119 050	127 200	138 700	149 700	160 550
	$i_{op} = Q_x / 10 \ S\%$	0,442	0,477	0,51	0,555	0,6	0,645
	$G_o = 7480 / x^2$	6830	5920	5570	5150	4820	4550

β	1,2	1,6	1,8	2,1	2,4	2,7
$1,03 \cdot G_o$ $1,03 \cdot 1,03 \cdot G_o = G_{np}$	7030 7240	6100 6280	5750 5920	5300 5450	4970 5120	4700 4840
$k_{c.c} G_{np}$	19 550	17 000	16 000	14 750	13 800	13 100
$C_{a.u} = k_{o.c} C_{np} + C_{cr}$	35 995	34 770	34 150	34 265	34 345	34 632
$\Delta = \sqrt{\frac{0,84 \cdot 120\,000}{2,46 \cdot G_o}}$	2,48	2,66	2,75	2,86	2,96	3,04
$\sigma_p = 24,20 \cdot x^3$	27,8	34,4	37,8	42,4	46,3	51,2
$d = 48,4 \cdot x$	50,6	54,5	56,1	58,5	60,3	62,1
$d_{12} = 1,45 \cdot d$	73,4	79,0	81,5	84,8	87,5	90,0
$l = \pi d_{12} / \beta$	192	155,5	142	127	114,5	105
$C = d_{12} + a_{12} + 2a_1 + 2a_{13} + 2a_3 + a_{33}$	120,7	128,1	131,4	135,8	139,2	142,7

Рис. 10-7. Транс-
форматор ТРДН-
25000/110. Зави-
симость P_K , i_0 и
 $C_{a.ч}$ от β .



Определение основных размеров (по § 3-6)

Диаметр стержня магнитной системы по (3-29)

$$d = 48,4 \sqrt[4]{1,8} = 55,8 \approx 56 \text{ см.}$$

Средний диаметр обмоток НН и ВН

$$d_{12} = 1,45 \cdot 56 = 81,2 \text{ см.}$$

Ориентировочная высота обмоток по (3-72)

$$l = \frac{\pi \cdot 81,2}{1,8} = 142,5 \text{ см.}$$

Активное сечение стержня по табл. (8-2)

$$П_c = 0,95 \cdot 2286,2 = 2171,68 \text{ см}^2.$$

Электродвижущая сила одного витка предварительно

$$u_B = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,54 \cdot 2171,68 \cdot 10^{-4} = 74,4 \text{ В.}$$

Число витков в обмотке НН

$$w_2 = \frac{6300}{74,4} = 84,7, \text{ принимаем } w_2 = 85.$$

Уточнение э. д. с. одного витка

$$u_B = \frac{6300}{85} = 74,118 \text{ В.}$$

Средняя плотность тока в обмотках по (5-2)

$$\Delta_{ср} = 0,746 \cdot 0,84 \frac{120\,000 \cdot 74,118}{25\,000 \cdot 81,2} = 2,76 \text{ А/мм}^2.$$

Расчет обмотки НН (по § 6-3)

По табл. 5-4 по мощности одной группы расщепленной обмотки НН $S'/2 = 4166,7 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, номинальному току группы $I_2 = 661,4 \text{ А}$ и

напряжению 6,3 кВ выбираем непрерывную катушечную обмотку из прямоугольного медного провода.

Ориентировочное сечение витка $P'_2 = 661,4/2,76 = 240 \text{ мм}^2$. Выбираем по табл. 5-3 восемь параллельных проводов ПБ сечением 30 мм^2

$$8 \times \frac{11,6 \times 2,63}{12,6 \times 3,63}, \text{ изоляция } 0,96 \approx 1,0 \text{ мм на две стороны.}$$

Некоторое увеличение изоляции витка предусмотрено для усиления продольной изоляции обмотки НН при импульсных воздействиях.

Сечение витка $P_2 = 8 \cdot 30 = 240 \text{ мм}^2$;

$$\Delta_2 = 661,4/240 = 2,76 \text{ А/мм}^2.$$

Канал между катушками принимаем 0,4 см, между группами расщепленной обмотки НН $h_{кр} = 2,0 \text{ см}$.

Предварительно определяем число катушек обмотки (6-63) для одной группы

$$n_{к2} \approx \frac{142,5/2 - 2,0}{1,26 + 0,4} = 41.$$

Число витков в катушке ориентировочно (6-65)

$$\omega_{кат} = 85/41 = 2,07.$$

После предварительного распределения витков в катушках обмотки и согласования размеров обмотки НН с размерами обмотки ВН принимаем следующую структуру распределенной обмотки НН.

Обмотка НН состоит из двух групп левой и правой намотки. Каждая группа наматывается на цилиндре из электрокартона с размерами $\varnothing 57,8/59,0 \cdot 160 \text{ см}$ на 18 рейках с прокладками между катушками шириной по 4,0 см. Осевой размер обмотки $l_2 = 148,5 \text{ см}$.

Распределение витков по катушкам в каждой группе:

$$2 \text{ катушки } D \text{ по } 1 \frac{13}{18} \text{ витка}$$

$$2 \text{ катушки } C \text{ по } 1 \frac{16}{18} \text{ витка}$$

$$40 \text{ катушек } E \text{ по } 1 \frac{17}{18} \text{ витка}$$

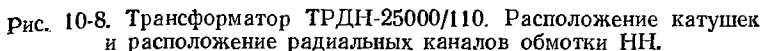
$$\text{Всего 44 катушки } 85 \text{ витков}$$

Расположение катушек на стержне и размеры радиальных каналов приняты по рис. 10-8.

Осевой размер обмотки

$$l_2 = \Sigma h_{кат} + k \Sigma h_k = 1,26 \cdot 44 \cdot 2 + 0,95 [2 (8 \cdot 0,6 + 35 \cdot 0,4) + 2,0] = 148,5 \text{ см.}$$

Радиальный размер обмотки $a_2 = 0,363 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 1,03 = 6,0 \text{ см}$.



Масса металла обмотки (группы) по (7-6)

$$G_{02} = 28 \cdot 3 \cdot 70 \cdot 85 \cdot 240 \cdot 10^{-5} = 1200 \text{ кг.}$$

Масса провода (табл. 5-5) $G_{\text{пр2}} = 1,02 \cdot 1200 = 1224 \text{ кг.}$

Масса провода обмотки НН $G_{\text{прНН}} = 2 \cdot 1224 = 2448 \text{ кг.}$

От обмотки НН обмотка ВН ($U_{испл}=200$ кВ) изолируется масляным каналом 5,0 см с двумя цилиндрами из электроизоляционного картона толщиной 0,4 см каждый (рис. 4-8). Радиальное строение осевого канала между обмотками НН и ВН — канал 0,9 см; цилиндр 0,4 см, канал 2,4 см, цилиндр 0,4 см, канал 0,9 см; всего 5,0 см.

Обмотка ВН (с вводом в середине) состоит из двух параллельных ветвей.

Для защиты от перенапряжений при импульсных воздействиях у начала каждой фазной обмотки ВН устанавливаются емкостные кольца, расположенные по рис. 10-9; катушки во входной зоне выполняются с дополнительной изоляцией всей катушки.

По табл. 5-8 ($S' = 8333 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $I_1 = 125,5 \text{ А}$; $U_{1\text{н}} = 115 \text{ кВ}$) выбираем для основной части непрерывную катушечную обмотку из пря-

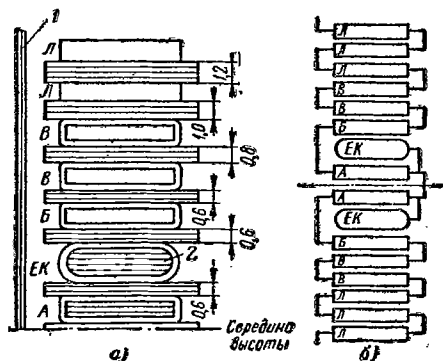


Рис. 10-9. Трансформатор ТРДН-25000/110.

а — входная часть обмотки ВН и расположение емкостного кольца (1 — цилиндр между ВН и НН; 2 — емкостное кольцо); б — схема присоединения емкостных колец.

моугольного провода. Входные катушки, расположенные у линейного конца каждой фазы, выполняются как двойные дисковые.

Число витков на ответвлениях для регулирования напряжения

$$w_{н1} = \frac{66\,397}{74,118} = 896;$$

$$w_{р1} = \frac{1,778}{100} \cdot \frac{66\,397}{74,118} = 15,9 \approx 16.$$

Напряжение, В (крайние положения)

линейное	фазное	Число витков
133 400	71 020	1040
115 000	66 397	896
96 600	55 773	752

Регулирование осуществляется по схеме рис. 10-5.

Главная часть обмотки ВН содержит 736 витков.

$$w_i = 896 - (9 \cdot 16 + 16) = 736.$$

При $U_{\text{имин}} = 96\,600$ В имеем $I_{\text{имин}} = 25\,000 / \sqrt{3 \cdot 96\,600} = 149,5$ А.

По этому значению тока определяем ориентировочное сечение витка обмотки ВН $P_1' = 149,5 / 2 \cdot 2,76 = 27,0$ мм².

Выбираем для основной части медный прямоугольный провод (табл. 5-3)

$$\text{ПБ } \frac{10,0 \times 2,83}{11,4 \times 4,23}; \text{ изоляция } 1,2 (1,35) \approx 1,4 \text{ мм на две стороны};$$

сечение витка $P_1 = 27,8$ мм².

Плотность тока (на основном ответвлении)

$$\Delta_i = \frac{125,5}{2 \cdot 27,8} = 2,26 \text{ А/мм}^2.$$

Для входных катушек (§ 4-5)

$$\text{ПБ } \frac{11,6 \times 2,83}{13,0 \times 4,23}; \text{ изоляция } 1,4 \text{ мм на две стороны}.$$

Входные катушки расположены в середине высоты обмотки (у линейного конца А обмотки ВН), имеют дополнительную изоляцию всей катушки:

1-я (катушка А) 1,0 мм на сторону; 2-я (катушка Б) 3,0 мм на сторону; 3-я и 4-я (катушки В) 1,5 мм на сторону. Емкостные кольца в каждой параллельной ветви расположены между катушками А и Б и имеют осевой размер: шайбы из электрокартона 1,0 см, металлическая обкладка $2 \cdot 0,05 = 0,1$ см; внешняя изоляция кабельной бумагой $2 \cdot 0,45 = 0,9$ см, а всего 2,0 см.

Предварительно выбираем осевой размер канала 0,6 см. Ориентировочное число катушек $n_{н1} = \frac{148,5 - 0,6}{1,3 + 0,6} = 78$. После предва-

рительного распределения витков в катушках обмотки и согласования размеров обмоток ВН и НН принимаем данные катушек обмотки ВН по табл. 10-2. Обмотка наматывается на 18 рейках с прокладками между катушками шириной 5,0 см.

Основные данные обмотки ВН

	Условные обозначения катушек						Всего на стержень
	А	Б	В	К	Л	М	
Назначение	С усиленной изоляцией	С усиленной изоляцией	С усиленной изоляцией	Основная	Основная	Основная	
Катушек в одной параллельной ветви	1	1	2	8	21	7	80
Число витков в катушке	151 ¹⁶ / ₁₈	141 ¹⁶ / ₁₈	151 ¹⁶ / ₁₈	181 ¹⁷ / ₁₈	181 ¹⁶ / ₁₈	171 ¹⁶ / ₁₈	736×2
Размеры провода без изоляции, мм	11,6×2,83	11,6×2,83	11,6×2,83	10,0×2,83	10,0×2,83	10,0×2,83	
Размеры провода в изоляции, мм	13,0×4,23	13,0×4,23	13,0×4,23	11,4×4,23	11,4×4,23	11,4×4,23	
Радиальный размер, см	7,2+0,4*= =7,6	7,2+0,8*= =8,0	7,3+0,5*= =7,8	8,3	8,3	7,9	
Осевой размер, см	1,5	1,9	1,6	1,14	1,14	1,14	
Диаметры D_1/D_1'	86,0/101,2	86,0/102,0	86,0/101,6	86,0/102,6	86,0/102,6	86,0/101,8	
Сечение витка, мм ²	32,3	32,3	32,3	27,8	27,8	27,8	
Плотность тока, А/мм ²	1,94	1,94	1,94	2,26	2,26	2,26	
Масса меди на три фазы, кг	80,5	76,5	163	669	1747	549	3285
Потери, Вт		2600			35 900		38 500

* При расчете радиального размера катушек с дополнительной изоляцией учитывается возможность разбухания ее и размер посадочного зазора (2—3 мм).

Осевое строение обмотки ВН (верхняя половина)

	Катушки	Каналы
8 катушек <i>K</i>	9,12 см	—
7 каналов $\times 0,6$ см	—	4,2 см
4 катушки <i>M</i>	4,56 см	—
4 канала $\times 0,6$ см	—	2,4 см
2 катушки <i>L</i>	2,28 см	—
2 канала $\times 0,6$ см	—	1,2 см
2 катушки <i>M</i>	2,28 см	—
2 канала $\times 0,6$ см	—	1,2 см
8 катушек <i>L</i>	9,12 см	—
8 каналов $\times 0,6$ см	—	4,8 см
8 катушек <i>L</i>	9,12 см	—
8 каналов $\times 0,8$ см	—	6,4 см
1 катушка <i>L</i>	1,14 см	—
1 канал $\times 1,0$ см	—	1,0 см
1 катушка <i>L</i>	1,14 см	—
1 канал $\times 1,2$ см	—	1,2 см
1 катушка <i>L</i>	1,14 см	—
1 канал $\times 1,0$ см	—	1,0 см
1 катушка <i>M</i>	1,14 см	—
1 канал $\times 1,0$ см	—	1,0 см
1 катушка <i>B</i>	1,6 см	—
1 канал $\times 0,8$ см	—	0,8 см
1 катушка <i>B</i>	1,6 см	—
1 канал $\times 0,6$	—	0,6 см
1 катушка <i>B</i>	1,9 см	—
1 канал $\times 0,6$ см	—	0,6 см
Емкостное кольцо	2,0 см	—
1 канал $\times 0,6$ см	—	0,6 см
1 катушка <i>A</i>	1,5 см	—
1 канал $\times 0,6$ см	—	0,6 см

Всего 40 катушек

Общая высота $l_1/2 = 49,64 + 0,9 \cdot 27,6 = 74,25$ см
(катушки) (каналы)

Коэффициент прессовки k принят 0,9 ввиду возможности усадки дополнительной изоляции на входных катушках

$$l_1 = 2 \cdot 74,25 = 148,5 \text{ см.}$$

Осевое строение нижней половины обмотки повторяет указанное осевое строение в обратном порядке.

Расчет регулировочной части обмотки ВН

Регулировочная часть обмотки ВН в комплекте состоит из двух частей.

I. Первая часть (верхняя) состоит из двух слоев:

- 1) регулировочной обмотки «грубой» — левой намотки, наматываемой на рейках на бумажно-бакелитовый цилиндр $\varnothing 109,2/110,80$ см;
- 2) регулировочной обмотки «тонкой» — левой намотки, наматываемой на рейках на цилиндр из электроизоляционного картона $\varnothing 118,9/119,7$ см.

II. Вторая часть (нижняя) состоит из таких же слоев правой намотки.

Расчет обмотки $PO_{\text{груб}}$

От обмотки ВН обмотка $PO_{\text{груб}}$ изолируется масляным каналом 5,6 см (в основной части) с цилиндром из электроизоляционного картона толщиной 0,4 см и бумажно-бакелитовым цилиндром 0,8 см в сочетании с угловой шайбой (рис. 4-8).

Обмотка $PO_{\text{груб}}$ выполняется непрерывной катушечной из прямоугольного медного провода. Для выравнивания электрического поля между верхней и нижней частями обмотки (зона выхода линейного конца обмотки ВН) устанавливаются емкостные кольца (рис. 10-6).

Линейное напряжение обмотки $PO_{\text{груб}}$

$$U_s = U_{\text{н}} \frac{17,78}{100} = 115\,000 \frac{17,78}{100} = 20\,447 \text{ В.}$$

Фазное напряжение

$$U_{\text{фз}} = \frac{20\,447}{\sqrt{3}} = 11\,804 \text{ В.}$$

Номинальный ток $I_s = 125,5$ А (в каждой части 62,75 А).

Число витков обмотки $PO_{\text{груб}}$

$$w_s = \frac{11\,804}{74 \cdot 118} = 160.$$

Ориентировочное сечение витка (каждой части)

$$P'_3 = \frac{62,75}{2,76} = 22,7 \text{ мм}^2.$$

Выбираем медный прямоугольный провод (табл. 5-3) ПБ $8,0 \times 2,83$, изоляция 1,2 (1,35) $\approx 1,4$ мм, на две стороны; сечение $9,4 \times 4,23$,

витка $P_3 = 22,1 \text{ мм}^2$; $\Delta_3 = \frac{62,75}{22,1} = 2,84 \text{ А/мм}^2$. Осевой канал между частями $PO_{\text{груб}}$ принимаем $h_{\text{кр}} = 20 \text{ см}$ (с учетом размещения в этом канале линейного ввода обмотки ВН — $U_{\text{нспл}} = 200 \text{ кВ}$).

Принимаем предварительно осевой размер канала между катушками по 0,6 см. Ориентировочное число катушек

$$n_8 = \frac{\frac{148,5 - 20,0}{2} + 0,6}{0,94 + 0,6} \approx 41.$$

Число витков в катушках ориентировочно $w_{\text{кв}} = \frac{160}{41} \approx 3,9$.

После предварительного распределения витков в катушках обмотки (для каждой части) и согласования размеров обмоток принимаем следующую структуру обмотки $PO_{\text{груб}}$.

Обмотка $PO_{\text{груб}}$ наматывается на бумажно-бакелитовый цилиндр $\varnothing 109,2/110,8 \text{ см}$ на 18 рейках с прокладками между катушками шириной по 4,0 см.

Данные I части обмотки $PO_{\text{груб}}$

6 катушек K по 3 $\frac{16}{18}$ витка

24 катушки L по 3 $\frac{14}{18}$ витка

12 катушек M по 3 $\frac{15}{18}$ витка

Всего 42 катушки 160 витков

Осевое строение обмотки $PO_{\text{груб}}$ (I — верхняя часть)

	Катушки	Каналы
6 катушек K	5,64 см	—
6 каналов $\times 0,5 \text{ см}$	—	3,0 см
24 катушки L	22,56 см	—
24 канала $\times 0,5 \text{ см}$	—	12,0 см
7 катушек M	6,58 см	—
7 каналов $\times 0,5 \text{ см}$	—	3,5 см
5 катушек M	4,7 см	—
5 каналов $\times 0,75 \text{ см}$	—	3,75 см
Емкостные кольца	2,0 см	—
<hr/>		
Всего 42 катушки	41,48	22,25 см

Осевое строение II части (нижней) повторяет указанное в обратном порядке.

Общая высота

$$I_3 = 2 \cdot 41,48 + 0,95 \cdot (2 \cdot 22,25 + 20) = 144 \text{ см.}$$

Радиальный размер катушки $a_3 = 0,423 \cdot 4 \cdot 1,03 = 1,75 \text{ см.}$

Внутренний диаметр $D_3' = 102,6 + 2 \cdot 5,0 = 112,6 \text{ см;}$

Наружный диаметр $D_3'' = 112,6 + 2 \cdot 1,75 = 116,1 \text{ см.}$

Масса меди обмотки по (7-6)

$$G_{\text{мд}} = 28 \cdot 3 \cdot 114,35 \cdot 160 \cdot 21,7 \cdot 2 \cdot 10^{-5} = 670 \text{ кг.}$$

Масса провода $G_{\text{прз}} = 1,02 \cdot 670 = 683,5 \text{ кг.}$

По испытательному напряжению нейтрали обмотки ВН ($U_{\text{испн}} = 100 \text{ кВ}$) канал между $PO_{\text{груб}}$ и $PO_{\text{тонк}}$ выбираем $a_{34} = 2,7 \text{ см}$ (рис. 4-8).

Цилиндр между обмотками $PO_{\text{груб}}$ и $PO_{\text{тонк}}$ — 118,7/119,5 см. Радиальное строение осевого канала между регулировочными обмотками $PO_{\text{груб}}$ и $PO_{\text{тонк}}$: канал 1,4 см; цилиндр 0,4 см; канал 0,9 см; всего 2,7 см.

Расчет обмотки $PO_{\text{тонк}}$

Линейное напряжение ступени регулирования

$$U_{\text{ст}} = \frac{1,778}{100} 115\,000 = 2044,7 \text{ В.}$$

Фазное напряжение

$$U_{\text{ст-ф}} = \frac{2044,7}{\sqrt{3}} = 1180,54 \text{ В.}$$

Напряжение регулируется девятью ступенями

$$U_{PO_{\text{тонк}}} = 9 \cdot 2044,7 = 18402,3 \text{ В.}$$

Одной ступени регулирования соответствует $w_{\text{ст}} = 16$; всего витков в обмотке $PO_{\text{тонк}}$ $w_4 = 9 \cdot 16 = 144$.

В режиме, когда все витки обмотки $PO_{\text{тонк}}$ обтекаются током, напряжение $U_1 = (115\,000 - 2044,7) \approx 112\,955 \text{ В}$, при этом $I_1 = \frac{25\,000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 112\,955} = 127,8 \text{ А} = I_4$ (см. также рис. 10-5).

Обмотка $PO_{\text{тонк}}$ состоит из двух частей, соединяемых между собой параллельно.

Ориентировочное сечение витка

$$P_4' = \frac{63,9}{2,76} = 23,2 \text{ мм}^2.$$

Для удобства выполнения регулировочных ответвлений каждая часть обмотки $PO_{\text{тонк}}$ наматывается как двухходовая винтовая обмотка (две вмотаны — одна в другую винтовые обмотки).

Один ход винтовой обмотки выполняется из пяти параллельных проводов, второй — из четырех параллельных проводов, причем в середине витка согласно рис. 10-10 размещается непрерывно на протяжении всей катушки полоска из электрокартона толщиной 0,5 см.

В каждом ходе винтовой обмотки (первой и второй части) выполняется одна общая транспозиция примерно на $\frac{1}{2}$ числа витков катушки, т. е. примерно на 8-м витке. (Полоска из электрокартона при этом не перекладывается.)

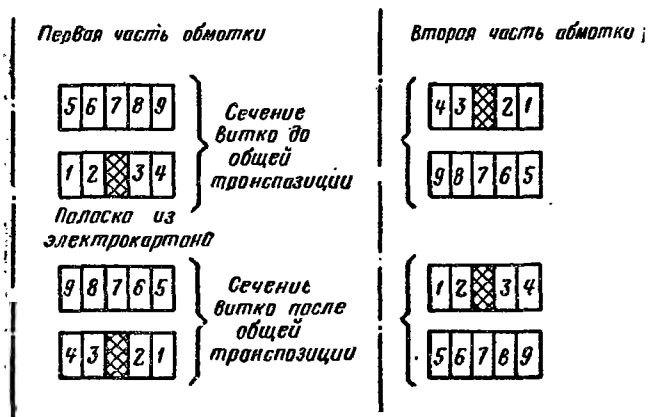


Рис. 10-10. Трансформатор ТРДН-25000/110. Схема транспозиций проводов в обмотке $PO_{груб}$.

Каждый провод обмотки образует одну ступень регулирования. Выбираем по табл. (5-3) провод

$$\text{ПБ } \frac{6,9 \times 3,05}{8,9 \times 5,05}; \text{ изоляция } 1,92 \approx 2,0 \text{ мм на две стороны.}$$

Сечение провода $P_4 = 20,6 \text{ мм}^2$.

Плотность тока

$$\Delta_4 = \frac{63,9}{20,6} = 3,1 \text{ А/мм}^2.$$

Каналы между соседними витками предварительно принимаем по 0,8 см.

Осовой канал между первой и второй частью обмотки $PO_{тонн}$ 32,0 см.

Общая высота обмотки (двух частей)

$$I_4 = 2[2 \cdot (16 + 1) \cdot 0,89] + 0,95[32,0 + 2 \cdot (2 \cdot 16 + 1) 0,8] = 141 \text{ см.}$$

Радиальный размер обмотки

$$a_4 = 0,505 \cdot 5 \cdot 1,03 = 2,6 \text{ см.}$$

Внутренний диаметр $D'_4 = 116,1 + 5,4 = 121,5$ см;

Наружный диаметр $D''_4 = 121,5 + 2 \cdot 2,6 = 126,7$ см.

Масса меди обмотки по (7-6)

$$G_{M4} = 28 \cdot 3 \cdot 124,1 \cdot 144 \cdot 20,6 \cdot 2 \cdot 10^{-5} = 616,5 \text{ кг.}$$

Внешняя изоляция обмотки $PO_{\text{тонк}}$: от обмотки $PO_{\text{тонк}}$ соседней фазы $a_{44} = 3,8$ см — масляный канал с барьером из электроизоляционного картона 0,3 см.

Расчет потерь короткого замыкания (по § 7-1)

При работе на основном ответвлении обмотки ВН номинальный ток протекает по главной части обмотки ВН ($w_1 = 736$ витков) и регулировочной обмотке грубого регулирования ($w_{\text{ро.груб}} = w_3 = 160$ витков).

Основные потери в главной части обмотки ВН определены при расчете обмотки (табл. 10-2):

$$P_{\text{осн1}} = 38\,500 \text{ Вт.}$$

Основные потери в обмотке $PO_{\text{груб}}$

$$P_{\text{осн3}} = 2,4 \cdot 2,84^2 \cdot 670 = 12\,950 \text{ Вт.}$$

Основные потери в обмотке НН (группы расщепленной обмотки НН соединены параллельно)

$$P_{\text{осн2}} = 2,4 \cdot 2,76^2 \cdot 1200 \cdot 2 = 43\,800 \text{ Вт.}$$

Коэффициенты добавочных потерь в обмотках определяются по (7-13) и (7-14).

Обмотка НН

$$k_{d2} = 1 + 0,095 \cdot 0,657^2 \cdot 0,263^4 \cdot 16^2 = 1,049;$$

$$\beta_2 = \left(\frac{1,16 \cdot 88}{148,5} \cdot 0,956 \right) = 0,657$$

(определение k_p см. дальше при расчете u_k).

Добавочные потери от несовершенства транспозиции

$$k_{d-тз} = 1 + 0,53 \cdot 10^{-2} \cdot 0,657^2 \left(\frac{50}{0,02135 \cdot 10^4} \right)^2 \times \\ \times 0,263^4 (16^1 - 20 \cdot 16^2 + 64) = 1,038.$$

Обмотка ВН (главная часть)

$$k_{d1} = 1 + (1 + 0,178 + 0,178^2) \cdot 0,095 \cdot 0,525^2 \cdot 0,283^4 \cdot 19^2 = 1,073;$$

$$\beta_1 = \left(\frac{8 \cdot 1,16 + 72 \cdot 1,0}{148,5} \cdot 0,956 \right) = 0,525$$

(коэффициент $(1 + 0,178 + 0,178^2)$ см. в расчете u_k).

Обмотка $PO_{\text{груб}}$

$$k_{\text{дз}} = 1 + 0,178^2 \cdot 0,095 \cdot 0,445^2 \cdot 0,283^4 \cdot 4^2 \approx 11,0;$$

$$\beta_{\text{з}} = \left(\frac{84 \cdot 0,8}{145} 0,956 \right) = 0,445.$$

Ввиду трудоемкости расчетов, связанных с определением радиального поля рассеяния (см. § 7-4) и добавочных потерь в обмотках от этого поля, в настоящем примере возьмем ориентировочно на основании опыта проектирования коэффициенты добавочных потерь от радиального поля рассеяния

для обмотки НН $k_{\text{д.р2}} = 1,07$; для обмотки ВН $k_{\text{д.р1}} = 1,05$; для обмотки $PO_{\text{груб}}$ $k_{\text{д.р3}} = 1,015$.

Плотность теплового потока на поверхности обмоток по (7-19) на номинальном ответвлении.

Обмотка НН

$$q_2 = \frac{1,07 \cdot 2,76 \cdot 661,4 \cdot 2 \cdot 1,167}{0,672 (1,26 + 6,0)} = 934 \text{ Вт/м}^2,$$

где $k_3 = 1 - \frac{18 \cdot 4,0}{\pi \cdot 70} = 0,672$, число реек $n_{\text{р}} = 18$, ширина междука-
тушечной прокладки $b_{\text{пр}} = 4,0$ см.

Обмотка ВН (главная часть)

$$q_1 = \frac{1,07 \cdot 2,26 \cdot 125,5 \cdot 19 \cdot 1,123}{2 \cdot 0,7 (1,14 + 8,3)} = 490 \text{ Вт/м}^2,$$

$$k_3 = 1 - \frac{18 \cdot 5,0}{\pi \cdot 94,3} = 0,7.$$

Обмотка $PO_{\text{груб}}$

$$q_3 = \frac{1,07 \cdot 2,87 \cdot 125,5 \cdot 4 \cdot 1,015}{2 \cdot 0,8 (0,94 + 1,75)} = 360 \text{ Вт/м}^2,$$

$$k_3 = 1 - \frac{18 \cdot 4,0}{\pi \cdot 114,35} = 0,8.$$

Потери в отводах:

Отводы НН

$$l_{\text{отв2}} = 14 \cdot 148,5 = 2080 \text{ см}; G_{\text{отв2}} = 240 \cdot 2080 \cdot 8900 \cdot 10^{-8} = 40 \text{ кг};$$

$$P_{\text{отв2}} = 2,4 \cdot 2,76^2 \cdot 40 = 730 \text{ Вт}.$$

Отводы ВН:

$$l_{\text{отв1}} = 7,5 \cdot 148,5 = 1115 \text{ см}; G_{\text{отв1}} = 27,8 \cdot 1115 \cdot 8900 \cdot 10^{-8} = 2,76 \text{ кг};$$

$$P_{\text{отв1}} = 2,4 \cdot 2,26^2 \cdot 2,76 = 34 \text{ Вт}.$$

Отводы $PO_{\text{груб}}$

$$l_{\text{отв3}} = 7,5 \cdot 145 = 1100 \text{ см}; G_{\text{отв3}} = 22,1 \cdot 1100 \cdot 8900 \cdot 10^{-8} = 2,2 \text{ кг};$$

$$P_{\text{отв3}} = 2,4 \cdot 2,87^2 \cdot 2,2 = 44 \text{ Вт}.$$

Потери в стенках бака и элементах конструкции. Расчет производится после определения размеров бака по (7-26).

Периметр бака $p_6 = 1245$ см.

Средний радиус бака

$$R = \frac{520 + 180 - 2 \cdot 130,5}{4} = 109,75 \text{ см.}$$

$$P_6 = \frac{2,2 \cdot 10,7^2 (1,5373 \cdot 2171,68)^2 \cdot 148,5^3 \cdot 1 \cdot 10^{-4}}{1245 [148,5 + 2 (109,75 - 40,5)]^2} = 8900 \text{ Вт.}$$

Полные потери короткого замыкания приведены в табл. 10-3, масса меди обмоток — в табл. 10-4.

Т а б л и ц а 10-3

Потери короткого замыкания, Вт

Обмотки	Вид потерь	Потери, Вт
ВН	Основные $P_{осн1}$ Добавочные $P_{доб1}$ В отводах $P_{отв1}$	38 500 4730 34
НН	Основные $P_{осн2}$ Добавочные $P_{доб2}$ В отводах $P_{отв2}$	43 800 7300 730
РО груб	Основные $P_{осн3}$ Добавочные $P_{доб3}$ В отводах $P_{отв3}$	12 950 195 44
	В баке и деталях P_0	8900
	Всего P_K	117 183 \approx 117 190

Т а б л и ц а 10-4

Масса меди и провода в обмотках трансформатора

Обмотка	ВН	НН	РО груб	РО тонк	Всего
Масса меди, кг	3285	2400	670	616,5	6971,5
Масса провода, кг . .	3351	2448	684	629	7112

Расчет напряжения короткого замыкания (по § 7-2)

Основные размеры обмоток, необходимые для расчета реактивной составляющей напряжения короткого замыкания u_p , приведены на рис. 10-11:

$$u_p = \frac{7,92 \cdot 50 \cdot 8333 \cdot 1,715 \cdot 10,9 \cdot 0,956}{74,118^2} 10^{-3} = 10,72\%,$$

где $\beta = \frac{\pi \cdot 81,0}{148,5} = 1,715;$

$$a_p = \frac{\frac{6,0 \cdot 70}{3} + 5,0 \cdot 81 + \frac{(1,0 + 0,178 + 0,178^2)}{3} \cdot 8,3 \cdot 94,3}{81} +$$

$$+ \frac{0,178^2 \cdot 5,0 \cdot 107,6 + \frac{0,178^2}{3} \cdot 1,75 \cdot 114,35}{81} = 10,9 \text{ см.}$$

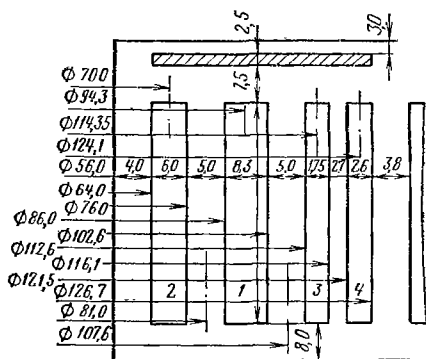


Рис. 10-11. Основные размеры обмоток трансформатора ТРДН-25000/110.

При расчете приведенного канала рассеяния a_p учитываются реальное распределение магнитодвижущих сил по обмоткам (рис. 10-12) и среднеквадратичное значение индукции поля рассеяния над обмоткой

$$k_p = 1 - 0,044 \times$$

$$\times \left(1 - e^{-\frac{1}{0,044}} \right) = 0,956.$$

Активная составляющая напряжения короткого замыкания

$$u_a = \frac{117 \ 190}{10 \cdot 25 \ 000} = 0,47\%.$$

Напряжение короткого замыкания

$$u_k = \sqrt{10,7^2 + 0,47^2} \approx 10,7\%,$$

что на $\frac{10,7 - 10,5}{10,5} 100 = 1,91\%$ больше заданного, при допуске $\pm 5\%$.

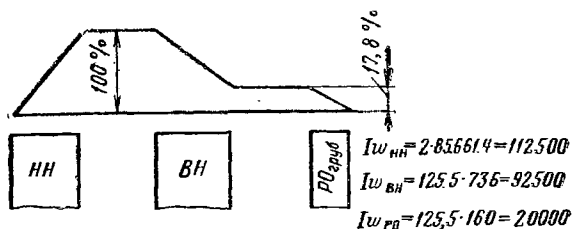


Рис. 10-12. Трансформатор ТРДН-25000/110. Эпюра распределения магнитодвижущих сил при номинальном напряжении

Расчет тока и механических сил при коротком замыкании (по § 7-3)

Установившийся ток короткого замыкания

$$ВН I_{к.у1} = 125,5 \frac{100}{10,7} = 1172 \text{ А};$$

$$\begin{matrix} \text{НН} \\ \text{(группы)} \end{matrix} I_{к.у2} = 661,4 \frac{100}{10,7} = 6170 \text{ А}.$$

Максимальное мгновенное значение I_k (по 7-39):

$$ВН i_{к.м1} = 1,41 \left(1 + e^{-\frac{\pi \cdot 0,47}{10,7}} \right) \cdot 1172 = 3090 \text{ А};$$

$$\text{НН } i_{к.м2} = 1,41 \left(1 + e^{-\frac{\pi \cdot 0,47}{10,7}} \right) \cdot 6170 = 16300 \text{ А}.$$

Радиальные силы по (7-43):

$$\text{НН } F_{p2} = 0,628 (2.85 \cdot 16300)^2 \cdot 1,715 \cdot 0,956 \cdot 10^{-6} = 7920000 \text{ Н};$$

$$\text{ВН}_{\text{(гл. часть)}} F_{p1} = 0,628 (736 \cdot 3090)^2 \cdot 1,715 \cdot 0,956 \cdot 10^{-6} = 5350000 \text{ Н};$$

$$\text{Р0}_{\text{групп}} F_{p3} = 0,628 (160 \cdot 3090)^2 \cdot 1,715 \cdot 0,956 \cdot 10^{-6} = 250000 \text{ Н}.$$

Разрывающие напряжения в обмотках от радиальных сил по (7-49)

$$\text{ВН } \sigma_{p1} = \frac{5350000}{2\pi \cdot 736 \cdot 27,8} = 41,6 \text{ МПа};$$

$$\text{НН } \sigma_{p2} = \frac{7920000}{2\pi \cdot 85 \cdot 240} = 61,7 \text{ МПа};$$

$$\text{Р0 } \sigma_{p3} = \frac{250000}{2\pi \cdot 160 \cdot 22,1} = 11,2 \text{ МПа}.$$

Для определения осевых сил, возникающих в обмотках в режиме короткого замыкания, от поперечных полей рассеяния можно воспользоваться методами, изложенными в [Л. 6, 8].

Определив распределение индукции поперечного поля по оси обмотки $B_q = f(l)$ по § 7-4, рассчитываем осевые усилия на каждом

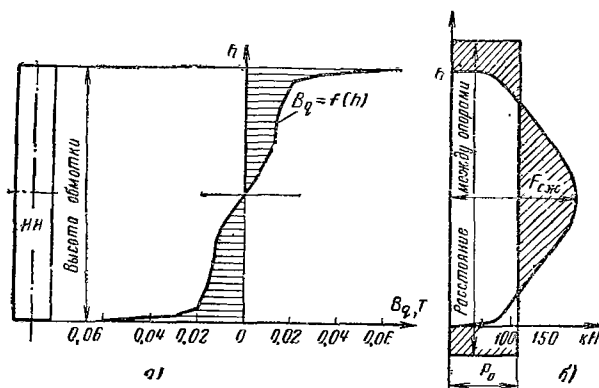


Рис. 10-13. Трансформатор ТРДН-25000/110.

a — индукция поперечного поля рассеяния для обмотки НН; *б* — распределение осевых механических сил для обмотки НН; P_0 — усилие запрессовки обмотки; $F_{сж}$ — максимальное сжимающее усилие.

из участков длины обмотки, где индукция распределена примерно по линейному закону, и, суммируя эти усилия, для обмотки получаем:

$$F = 0,628 R_{ср} \frac{l_{к-м}}{l} \sum_{i=0}^l B_{qi} l_i \cdot 10^{-2}$$

(см. также рис. 10-13, *a* и *б*),

где $R_{ср}$ — средний радиус обмотки, см;

l — высота обмотки, см;

B_{qi} — индукция поля рассеяния в данной точке, Т;

l_i — высота участка, для которого рассчитывается составляющая осевого усилия.

Таким способом построена эпюра индукции поперечного поля и осевых усилий для обмотки НН (при работе двух групп обмотки) — рис. 10-13, *a*. Высота L — расстояние между неподвижными опорами от верхней полки нижней ярмовой балки до прессующего кольца). P_0 — усилие, с которым должна быть запрессована обмотка:

$$P_0 = 110\,000 \text{ Н.}$$

Максимальная сжимающая сила в обмотке НН $F_{сж} = 200\,000 \text{ Н}$. Напряжение сжатия в междукатушечных прокладках

$$\sigma_{сж2} = \frac{200\,000}{18 \cdot 40 \cdot 60} = 4,65 \text{ МПа,}$$

что ниже предела, допустимого для электроизоляционного картона ($\sigma_{доп} = 40$ МПа).

Расчет температуры обмоток при коротком замыкании

Время, в течение которого температура обмоток достигает 250°C , находим по (7-52):

$$\text{ВН } t_{к1} = 2,5 \left(\frac{10,7}{2,26} \right)^2 = 56 \text{ с};$$

$$\text{РО}_{\text{групп}} t_{к3} = 2,5 \left(\frac{10,7}{2,87} \right)^2 = 34,8 \text{ с};$$

$$\text{НН } t_{к2} = 2,5 \left(\frac{10,7}{2,76} \right)^2 = 37,5 \text{ с}.$$

Температура обмоток через 5 с после возникновения короткого замыкания — по (7-51) (при $\vartheta_n = 90^\circ\text{C}$):

$$\text{ВН } \vartheta_{к1} = \frac{670 \cdot 5}{12,5 \left(\frac{10,7}{2,26} \right)^2 - 5} + 90 = 105,2^\circ\text{C};$$

$$\text{РО}_{\text{групп}} \vartheta_{к3} = \frac{670 \cdot 5}{12,5 \left(\frac{10,7}{2,87} \right)^2 - 5} + 90 = 120,1^\circ\text{C};$$

$$\text{НН } \vartheta_{к2} = \frac{670 \cdot 5}{12,5 \left(\frac{10,7}{2,76} \right)^2 - 5} + 90 = 116,8^\circ\text{C}.$$

Расчет магнитной системы (по § 8-1—8-3)

Выбираем конструкцию плоской трехфазной магнитной системы, собираемой впереплет (шихтованной) по схеме на рис. 10-14, б с четырьмя косыми и тремя прямыми стыками. Стержень прессуется бандажами из стеклоленты, ярма — балками и стальными полубандажами. Верхнее и нижнее ярма связаны вертикальными стяжными шпильками.

Сечение стержня — с 15 ступенями; размеры пакетов — по табл. 8-2в. Сечение ярма повторяет сечение стержня; три последних пакета ярма объединены в один с шириной пластины 29,5 см и толщиной 3,4 см; в ярме 12 ступеней. В стержне и ярме два продольных канала по 0,6 см. Сечения стержня и ярма — по рис. 10-14, а.

Полное сечение стержня $P_{\phi,с} = 2286,2 \text{ см}^2$ (табл. 8-2).

Активное сечение $P_c = 0,95 \cdot 2286,2 = 2171,68 \text{ см}^2$.

Полное сечение ярма $P_{\phi,я} = 2316,7 \text{ см}^2$.

Активное сечение ярма $P_я = 0,95 \cdot 2316,7 = 2201,32 \text{ см}^2$.

Ширина ярма $b_я = 2 \cdot 26,2 = 52,4 \text{ см}$.

Длина стержня при наличии нажимного кольца (§ 8-1)

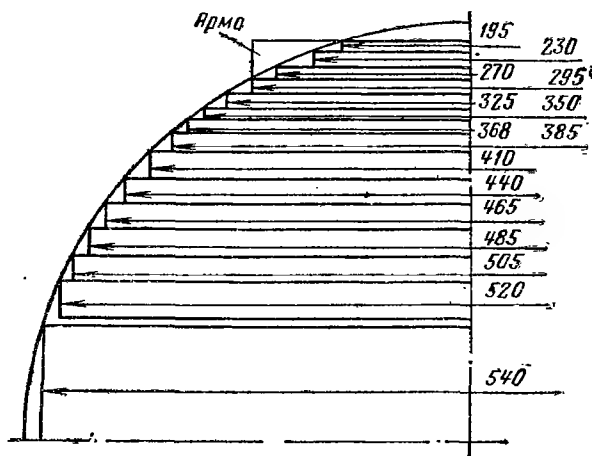
$$l_c = 148,5 + 8,0 + 7,5 + 3,0 + 2,5 = 169,5 \text{ см}.$$

Расстояние между осями соседних стержней

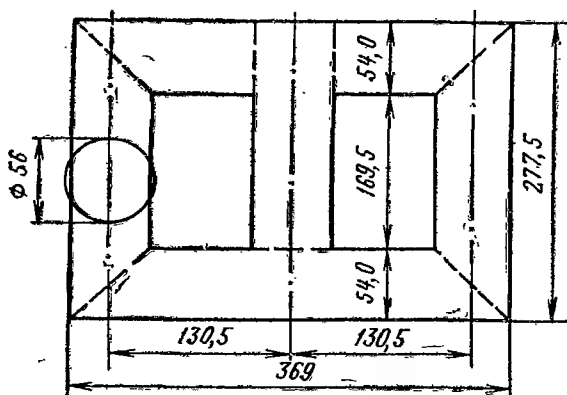
$$C = 126,7 + 3,8 = 130,5 \text{ см.}$$

Масса стали в стержнях по (8-17)

$$G'_c = 3 \cdot 2171,68 \cdot 169,5 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} = 8440 \text{ кг.}$$



а)



б)

Рис. 10-14. Размеры магнитной системы трансформатора ТРДН-25000/110.

а — сечение стержня и ярма (размеры в миллиметрах); б — основные размеры магнитной системы (размеры в сантиметрах).

Масса угла по (8-11)

$$G_y = 2 \cdot 0,95 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} (54,0 \cdot 54,0 \cdot 7,4 + 52,0 \cdot 52,0 \times \\ \times 2,4 + 50,5 \cdot 50,5 \cdot 1,7 + 48,5 \cdot 48,5 \cdot 1,9 + 46,5 \cdot 46,5 \cdot 1,6 + \\ + 44,0 \cdot 44,0 \cdot 1,7 + 41,0 \cdot 41,0 \cdot 1,8 + 38,5 \cdot 38,5 \cdot 1,2 + \\ + 36,8 \cdot 36,8 \cdot 0,8 + 35,0 \cdot 35,0 \cdot 0,7 + 32,5 \cdot 32,5 \cdot 1,0 + \\ + 29,5 \cdot 29,5 \cdot 1,0 + 27,0 \cdot 29,5 \cdot 0,7 + 23,0 \cdot 29,5 \cdot 1,0 + 19,5 \times \\ \times 29,5 \cdot 0,7) = 785 \text{ кг.}$$

Масса стали в местах стыка пакетов стержня и ярма по (8-18)

$$G_c'' = 3 (2171,68 \cdot 54,0 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} - 785) = 345 \text{ кг.}$$

Масса стали в стержнях по (8-16)

$$G_c = 8440 + 345 = 8785 \text{ кг.}$$

Масса стали в ярмах по (8-13) — (8-15)

$$G'_я = 2 (3 - 1) \cdot 130,5 \cdot 2201,32 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} = 8800 \text{ кг;}$$

$$G''_я = 2 \cdot 785 = 1570 \text{ кг;}$$

$$G_я = 8800 + 1570 = 10\,370 \text{ кг.}$$

Полная масса стали трансформатора

$$G_{ст} = 8785 + 10\,370 = 19\,145 \text{ кг.}$$

Расчет потерь и тока холостого хода (по § 8-2)

Магнитная система собирается из электротехнической тонколистовой рулонной холоднокатаной текстурованной стали марки Э330А-0,35 по ГОСТ 802-58.

Индукция в стержне

$$B_c = \frac{74,118 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 2171,68} = 1,537 \text{ Т.}$$

Индукция в ярме

$$B_я = \frac{74,118 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 2201,32} = 1,517 \text{ Т.}$$

По табл. 8-4 находим удельные потери:

при $B_c = 1,537 \text{ Т}$

$$p_c = 1,174 \text{ Вт/кг; } p_{з.с} = 0,0806 \text{ Вт/см}^2;$$

при $B_{я} = 1,517 \text{ Т}$

$$p_{я} = 1,134 \text{ Вт/кг}; \quad p_{з.я} = 0,0775 \text{ Вт/см}^2;$$

при $B_{з} = 1,537 / \sqrt{2} = 1,085 \text{ Т}$

$$p_{з} = 0,024 \text{ Вт/см}^2.$$

По формуле (8-31) потери холостого хода

$$\begin{aligned} P_x &= 1,0 \cdot 1,03 \cdot 1,04 \cdot 1,0 [1,174 \cdot 8785 + 1,134 (8800 - 4 \cdot 785) + \\ &+ \frac{1,174 + 1,134}{2} 785 \cdot 8,95 + 0,024 \cdot 4 \cdot \sqrt{2} \times \\ &\times 2171,68 + 0,0806 \cdot 1 \cdot 2171,68 + 0,0775 \cdot 2 \cdot 2201,32] = 29 \, 200 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Потери холостого хода $P_x = 29 \, 200 \text{ Вт}$.

По тексту гл. 8 и табл. 8-6 находим коэффициенты для стали Э330А — 0,35 при наличии отжига: $k_{п.я} = 1,0$; $k_{п.ш} = 1,03$; $k_{п.п} = 1,04$; $k_{п.з} k_{п.р} = 1,0$; $k_{\phi} = 4,0$ ($k_{к.ос} k'_{п.у} + k_{п.р} k''_{п.у}$) = $k_{у.п} = 8,92$.

Число косых зазоров 4; прямых зазоров в стержне 1, в яреме 2 (рис. 10-14, б).

По табл. 8-11 находим удельные намагничивающие мощности:

$$\text{при } B_c = 1,537 \text{ Т } q_c = 2,21 \text{ В} \cdot \text{А/кг}; \quad q_{с.з} = 2,32 \text{ В} \cdot \text{А/см}^2;$$

$$\text{при } B_{я} = 1,517 \text{ Т } q_{я} = 2,08 \text{ В} \cdot \text{А/кг}; \quad q_{я.з} = 2,12 \text{ В} \cdot \text{А/см}^2;$$

$$\text{при } B_{з} = 1,085 \text{ Т } q_{з} = 0,11 \text{ В} \cdot \text{А/см}^2.$$

По формуле (8-43) находим намагничивающую мощность при холостом ходе:

$$\begin{aligned} Q_x &= 1,0 \cdot 1,03 \cdot 1,09 \{1,1 \cdot 1,0 [2,21 \cdot 8785 + \\ &+ 2,08 (8800 - 4 \cdot 785) + \frac{2,21 + 2,08}{2} \times \\ &\times 785 \cdot 23,9] + 0,11 \cdot 4 \sqrt{2} \cdot 2171,68 + 2,32 \cdot 1 \cdot 2171,68 + \\ &+ 2,12 \cdot 2 \cdot 2201,32\} = 106 \, 000 \text{ В} \cdot \text{А}; \end{aligned}$$

По тексту гл. 8 и табл. 8-12 находим коэффициенты для стали Э330А-35 при наличии отжига: $k_{т.я} = 1,0$; $k_{т.ш} = 1,03$; $k_{т.п} = 1,09$; $k_{т.з} = 1,1$; $k_{т.р} = 1,0$: ($k_{к.ос} k'_{т.у} + k_{т.р} k''_{т.у}$) = $k_{у.т} = 23,9$.

Число зазоров — по рис. 10-14, б.

Реактивная составляющая тока холостого хода

$$i_{ор} = \frac{106 \, 000}{10 \cdot 25 \, 000} = 0,424\%.$$

Активная составляющая

$$i_{oa} = \frac{29 \, 200}{10 \cdot 25 \, 000} = 0,117\%.$$

Ток холостого хода

$$i_0 = \sqrt{0,424^2 + 0,117^2} = 0,441\%.$$

Ток холостого хода (для НН)

$$i_{0P} = 1145 \frac{0,424}{100} = 4,85 \text{ A}; \quad i_{0a} = 1145 \frac{0,117}{100} = 1,34 \text{ A};$$

$$i_0 = 5,05 \text{ A}.$$

Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \left(1 - \frac{117 \ 190 + 29 \ 200}{25 \ 000 \cdot 10^3 + 29 \ 200 + 117 \ 190} \right) 100 = 99,418\%.$$

Тепловой расчет трансформатора

Перепады температуры на обмотках (по § 9-5).

Внутренний перепад по (9-9):

Обмотка ВН

$$\Theta_{01} = \frac{490 \cdot 0,07}{0,0017} \cdot 10^{-4} = 2,02^\circ\text{C} (\lambda_{вз} \text{ по табл. 9-1}).$$

Обмотка НН

$$\Theta_{02} = \frac{934 \cdot 0,05}{0,0017} \cdot 10^{-4} = 2,75^\circ\text{C}.$$

Обмотка РО_{групп}

$$\Theta_{03} = \frac{360 \cdot 0,07}{0,0017} \cdot 10^{-4} = 1,5^\circ\text{C}.$$

Перепады на поверхности обмоток по (9-20):

Обмотка ВН

$$\Theta_{0.м1} = 0,9 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 0,35 \cdot 490^{0,6} = 15,8^\circ\text{C};$$

k_1 по тексту § 9-5 — для всех обмоток $k_1 = 0,9$;

$k_2 = 1,1$ для всех трех обмоток;

k_3 для $h_k/a = 0,6/8,3 = 0,0725$ по табл. 9-3 $k_3 = 1,1$.

Обмотка НН

$$\Theta_{0.м2} = 0,9 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 0,35 \cdot 934^{0,6} = 23^\circ\text{C};$$

для $h_k/a = 0,4/6,0 = 0,067$ по табл. 9-3 $k_3 = 1,1$.

Обмотка РО_{групп}

$$\Theta_{0.м3} = 0,9 \cdot 1,1 \cdot 0,8 \cdot 0,35 \cdot 360^{0,6} = 10,7^\circ\text{C};$$

для $h_k/a = 0,5/1,75 = 0,286$ по табл. 9-3 $k_3 = 0,8$.

Полные перепады температуры на обмотках:

$$\text{ВН } \theta_{0, \text{м.ср}} = 15,8 + 2,02 = 17,82^\circ\text{C};$$

$$\text{НН } \theta_{0, \text{м.ср}} = 23 + 2,75 = 25,75^\circ\text{C};$$

$$\text{РО}_{1\text{Р}} \theta_{0, \text{м.ср}} = 10,7 + 1,5 = 12,2^\circ\text{C}.$$

Выбор основных размеров бака (по § 9-6)

Выбираем конструкцию гладкий масляный бак с навесными трубчатыми охладителями, обдуваемыми индивидуальными вентиляторами

Ширина бака выбирается из условия изоляции отводов от наружной обмотки $\text{РО}_{\text{тонк}}$ и от стенок бака. Отвод ВН по табл. 4-11 имеет диаметр стержня 1,2 см, изоляция кабельной бумагой 2 см на сторону, общая толщина отводов $d_3 = 1,2 + 2 \cdot 2 = 5,2$ см; расстояние от отвода до гладкой стенки бака $s_1 \geq 9,5$ см; расстояние отвода до прессыющей балки ярма (при наличии щита $\delta = 0,3$ см) $s_2 \geq 11,5$ см. Общее расстояние от обмотки РО_T до стенки бака не менее $s_1 + s_2 + d_3 = 9,5 + 11,5 + 5,2 = 26,2$ см.

Отвод НН — медная шина сечением $4,5 \times 64$ мм с бумажной изоляцией (на ток 661,4 А); толщина изоляции на сторону 0,3 см. Расстояние отвода до об-

Рис. 10-15. Расположение радиаторов на баке трансформатора ТРДН-25000/110.

мотки $\text{РО}_{\text{тонк}}$ по табл. 4-12 ($U_{\text{исп.н}} = 100$ кВ; $U_{\text{исп. отвода}} = 25$ кВ «до 85 кВ») при $\delta = 0,3$ см $s_3 = 10$ см (промежуточное значение). Расстояние отвода до стенки бака по табл. 4-11 $s_4 \geq 2,0$ см. Общее расстояние от обмотки РО_T до стенки бака не менее $s_3 + s_4 + d_4 = 10 + 2,0 + 1,05 = 13,05$ см.

При центральном расположении трансформатора в баке и расстоянии обмотка $\text{РО}_{\text{тонк}}$ — бак около 26,2 см ширина бака (рис. 10-15) $B = 126,7 + 52,4 = 179,1 \approx 180$ см. Длина бака $A = 2 \cdot 130,5 + 126,7 + 31 + 100 = 518,7 \approx 520$ см.

Для размещения переключающего устройства РПН берем 100 см. Глубина бака $H_6 = 8,0 + 169,5 + 2 \cdot 54,0 + 14,5 = 292$ см. $H_{\text{я.к.}} = 14,5$ см (для трансформаторов РПН).

Периметр бака $p_6 = 2(520 - 180) + \pi \cdot 180 = 1245$ см.

Поверхность гладкого бака $P_{\text{гл}} = 1245 \cdot 299 \cdot 10^{-4} = 36,4$ м².

Поверхность излучения приближенно по (9-35)

$$P_{\text{н}} = 36,4 \cdot 1,8 \cdot 10^{-4} = 65,5 \text{ м}^2, \quad k = 1,8$$

Задаемся превышением средней температуры наиболее нагретой обмотки над воздухом $\theta_{0, \text{л}} = 65^\circ\text{C}$. Среднее превышение температу-

ры масла над воздухом $\Theta_{м.в} = 65 - 25,75 = 39,25^\circ\text{C}$. Среднее превышение температуры стенки бака над воздухом $\Theta_{б.в} = 39,25 - 5 = 34,25^\circ\text{C}$.

По (9-30) находим ориентировочное значение поверхности конвекции бака

$$P_k = \frac{1,05 \cdot (117\,190 + 29\,200)}{2,5 \cdot 34,25^{1,25}} - 1,12 \cdot 65,5 = 656,5 \text{ м}^2.$$

Поверхность конвекции охладителей вместе с поверхностью конвекции гладкой стенки ($P_{к.гл} = 36,4 \text{ м}^2$) должна составить $656,5 \text{ м}^2$, в том числе охладители $620,1 \text{ м}^2$. Расстояние между осями патрубков охладителей

$$A \leq H_6 - 34 = 292 - 34 = 258 \text{ см}.$$

Выбираем 11 охладителей с расстоянием между осями патрубков $248,5 \text{ см}$ (табл. 9-9) с поверхностью коллекторов $2 \cdot 0,66 = 1,32 \text{ м}^2$. Поверхность конвекции одного охладителя при дутье (табл. 9-9)

$$P_{к.охл} = 29,1 \cdot 2,24 + 1,32 \cdot 1,6 = 67,3 \text{ м}^2.$$

Поверхность конвекции бака с 11 охладителями

$$P_k = 36,4 \cdot 1,0 + 9,35 \cdot 0,5 + 11 \cdot 67,3 = 781,4 \text{ м}^2;$$

$$P_{к-кр} = \left[(180 + 20) (520 - 180) + \frac{\pi \cdot 180^2}{4} \right] \cdot 10^{-4} = 9,35 \text{ м}^2.$$

Поверхность излучения (рис. 10-15):
периметр $p_n = 2(630 + 450) = 21,6 \text{ м}$;
поверхность $P_n = 21,6 \cdot 2,92 = 63 \text{ м}^2$.

Окончательный расчет превышения температуры обмоток и масла трансформатора (по § 9-7)

Среднее превышение температуры стенки бака над температурой воздуха по (9-42)

$$\Theta_{б.в} = \left[\frac{1,05 (117\,190 + 29\,200)}{2,8 \cdot 63 + 2,5 \cdot 781,4} \right]^{0,8} = 31^\circ\text{C}.$$

Превышение температуры масла над температурой стенки по (9-43)

$$\Theta_{м.б} = 0,9 \cdot 0,165 \left[\frac{1,05 (117\,190 + 29\,200)}{36,4 + 0,5 \cdot 9,35 + 11 \cdot 29,1 + 11 \cdot 1,32} \right]^{0,6} = 5,5^\circ\text{C}.$$

Превышение температуры масла в верхних слоях над воздухом

$$\Theta_{м.в.в} = 1,2 (31 + 5,5) = 44^\circ\text{C} < 55^\circ\text{C}.$$

Превышение температуры обмоток над воздухом

$$\Delta T_{17,82 + 31,0 + 5,5} = 54,32^\circ\text{C} < 65^\circ\text{C};$$

$$\text{НН } 25,75 + 31,0 + 5,5 = 62,25^\circ\text{C} < 65^\circ\text{C};$$

$$\text{РО}_{\text{груб}} 12,2 + 31,0 + 5,5 = 48,7^\circ\text{C} < 65^\circ\text{C}.$$

Определение массы масла (§ 9-8)

Объем бака

$$V_{\text{б}} = \left[(520 - 180) \cdot 180 + \frac{180^2 \pi}{4} \right] \cdot 292 \cdot 10^{-6} = 25,4 \text{ м}^3.$$

Объем активной части

$$V_{\text{а.ч}} = \frac{1,2 (7112 + 19145)}{5,8} \cdot 10^{-3} = 5,42 \text{ м}^3.$$

Объем масла в баке $V_{\text{м.б}} = 25,4 - 5,42 = 19,98 \text{ м}^3$.

Масса масла в баке $G_{\text{м.б}} = 900 \cdot 19,98 = 18000 \text{ кг}$.

Масса масла в охладителях $G_{\text{м.о}} = 11 \cdot 341 = 3750 \text{ кг}$.

Общая масса масла $G_{\text{м}} = 18000 + 3750 = 21750 \text{ кг}$.

10-3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА ТИПА ТМ-630/35 (ПО § 6-3)

Обмотка НН из алюминиевой ленты (фольги). Основные данные обмотки: напряжение фазное 690 В; электродвижущая сила витка $u_{\text{в}} = 9,6 \text{ В}$; число витков $w = 72$; фазный ток $I_{\text{ф}} = 304 \text{ А}$; плотность тока $\Delta_1 = 1,5 \div 1,6 \text{ А/мм}^2$; внутренний диаметр обмотки $D'_1 = 22,6 \text{ см}$; высота обмотки $l = 79 \text{ см}$.

Обмотка наматывается из алюминиевой ленты (фольги) по ГОСТ 13726-68. Ширина ленты 80 см, обрезка кромок с двух сторон на 1 см.

Сечение ленты предварительно $P'_1 = I_{\text{ф}} / \Delta = 304 / 1,55 = 196 \text{ мм}^2$. Толщина ленты $\delta = P'_1 / l = 196 / 790 = 0,24 \approx 0,25 \text{ мм}$. Сечение витка $P_1 = 0,25 \cdot 790 = 197,5 \text{ мм}^2$. Плотность тока $\Delta_1 = 304 / 197,5 = 1,54 \text{ А/мм}^2$.

Обмотка состоит из двух катушек по 36 витков, разделенных осевым каналом шириной 0,8 см. Междувитковая изоляция — один слой кабельной бумаги толщиной 0,12 мм. Кабельная бумага выступает на 0,3 см на верхнем и нижнем торцах обмотки (ширина полосы бумаги 79,6 см). После намотки торцы обмотки заливаются эпоксидной смолой и запекаются.

Радиальный размер обмотки

$$a_1 = (36 \cdot 0,025 + 36 \cdot 0,012) \cdot 2 + 0,8 = 1,35 + 1,35 + 0,8 = 3,5 \text{ см}.$$

Диаметры: внутренний $D'_1 = 22,6 \text{ см}$; наружный $D''_1 = 22,6 + 2 \cdot 3,5 = 29,6 \text{ см}$.

Масса металла обмотки по (7-7)

$$G_0 = 8,47 \cdot 3 \cdot 26,1 \cdot 72 \cdot 197,5 \cdot 10^{-5} = 94 \text{ кг}.$$

Потери в обмотке по (7-4)

$$P_{\text{снл}} = 12,75 \cdot 1,54^2 \cdot 94 = 2840 \text{ Вт.}$$

Поверхность охлаждения обмотки по (6-48)

$$P_{\text{ол}} = 3 \cdot 2 \cdot 0,75\pi (22,6 + 29,6) \cdot 79 \cdot 10^{-4} = 5,84 \text{ м}^2.$$

Плотность теплового потока на поверхности обмотки

$$q_1 = \frac{2840}{5,84} = 486 \text{ Вт/м}^2.$$

Потери в единице объема обмотки по (9-16) при $a' = a$ и $b' = b$

$$p_1 = \frac{3,44 \Delta^2 a \cdot 10^{-2}}{a + \delta_{\text{м.с}}} = \frac{3,44 \cdot 1,54^2 \cdot 0,025}{(0,025 + 0,012)} 10^{-2} = 0,049 \text{ Вт/см}^3.$$

Поскольку теплопроводность алюминия во много раз больше теплопроводности кабельной бумаги, для радиального движения тепла можно определить среднюю теплопроводность обмотки

$$\lambda_{\text{ср}} = \lambda_{\text{вз}} \frac{a + \delta_{\text{м.с}}}{\delta_{\text{м.с}}} = 0,0017 \frac{0,025 + 0,012}{0,012} = 0,052 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

Внутренний перепад температуры по (9-10)

$$\Theta_0 = \frac{0,049 \cdot 1,35^2}{8 \cdot 0,0052} = 2,2^\circ\text{C}.$$

Средний внутренний перепад температуры в обмотке

$$\Theta_{\text{о.ср}} = \frac{2}{3} 2,2 = 1,5^\circ\text{C}.$$

Перепад температуры на поверхности

$$\Theta_{\text{о.м}} = 0,285 \cdot 486^{0,6} = 11,7^\circ\text{C}.$$

Полный средний перепад между обмоткой и маслом

$$\Theta_{\text{о.м.ср}} = 1,5 + 11,7 = 13,2^\circ\text{C}.$$

Расчет обмотки ВН трансформатора типа ТМ-630/35 (по § 6-3)

Расчет многослойной цилиндрической обмотки класса напряжения 35 кВ отличается некоторыми особенностями.

Основные данные обмотки

Напряжение фазное $U_{\text{ф}} = 20\,204 \text{ В}$; электродвижущая сила витка $u_{\text{в}} = 9,6 \text{ В}$; ток фазный $I_2 = 10,4 \text{ А}$; число витков на ответвлениях: 2209—2157—2105—2053—2001. Сечение витка $8,45 \text{ мм}^2$. Марка провода АПБ, круглое сечение $\varnothing 3,28/3,68 \text{ мм}$. Высота обмотки $l =$

$=79$ см. Обмотка наматывается на цилиндре $\varnothing 34/35 \times 89$ см. Наружный диаметр обмотки НН 29,6 см; изоляционное расстояние $a_{12}=2,7$ см.

Расчет обмотки

$$\text{Плотность тока } \Delta_2 = \frac{10,4}{3,45} = 1,23 \text{ А/мм}^2.$$

$$\text{Число витков в слое } w_{\text{сл}} = \frac{79 \cdot 10}{3,68} - 1 = 214.$$

$$\text{Число слоев в обмотке } n_{\text{сл}} = \frac{2210}{214} = 10,3 \approx 11.$$

$$\text{Число витков в слоях: 1-й—9-й слои } 214 \cdot 9 = 1926$$

$$10\text{-й слой } 75 + 2 \cdot 26 = 127$$

$$11\text{-й слой } 26 \times 6 = 156$$

$$\text{Всего } 2209$$

Для симметричного расположения регулировочных витков по высоте обмотки в двух последних слоях (10-м и 11-м) располагаем витки по схеме на рис. 10-16, а (аналогично схеме на рис. 6-6, б).

Разделяем обмотку ВН на две concentрические катушки в четыре слоя — внутренняя В и в семь слоев — наружная Г с осевым каналом между катушками $a'_{22}=0,6$ см. Для защиты от импульсных перенапряжений под внутренний слой обмотки на поверхность цилиндра устанавливается экран — разрезанный по образующей цилиндр из алюминиевого листа толщиной 0,05 см. Экран изолируется с двух сторон кабельной бумагой. Общая расчетная толщина экрана с изоляцией 0,3 см.

Рабочее напряжение двух слоев обмотки

$$U_{\text{мсл}} = 9,6 \cdot 2 \cdot 214 = 4100 \text{ В.}$$

По табл. 4-7 находим: междуслойная изоляция кабельная бумага 7 слоев $\times 0,12 = 0,84$ мм; выступ изоляции на торцах обмотки 2,2 см. Разрез обмотки показан на рис. 10-16, б. Радиальный размер обмотки

$$\begin{aligned} a'_2 &= \text{экран} + \text{катушка В} + \text{канал} + \text{катушка Г} = \\ &= 0,3 + (4 \cdot 0,368 + 3 \cdot 0,084) + 0,6 + (7 \cdot 0,368 + 7 \cdot 0,084) = \\ &= 0,3 + 1,722 + 0,6 + 3,168 = 5,79 \approx 5,8 \text{ см.} \end{aligned}$$

При расчете напряжения короткого замыкания следует пользоваться:

$$a_2 = a'_2 - \delta_{\text{экр}} = 5,8 - 0,3 = 5,5 \text{ см.}$$

$$\text{Внутренний диаметр } D'_2 = 29,6 + 2 \cdot 2,7 = 35 \text{ см,}$$

$$\text{Наружный диаметр } D''_2 = 35 + 2 \cdot 5,8 = 46,6 \text{ см.}$$

Последние пять витков на каждой ступени, т. е. витки 1997—2001; 2049—2053; 2101—2105; 2153—2157 и 2205—2209 изолируются дополнительно лакотканью ЛХММ-0,20 в один слой.

Поверхность охлаждения обмотки по (6-48)

$$P_0 = 1,5 \cdot 3 \cdot 0,83\pi (35 + 46,6) \cdot 79 \cdot 10^{-4} = 7,65 \text{ м}^2.$$

Масса металла обмотки по (7-7) на три фазы

$$G_0 = 8,47 \cdot 3 \cdot 40,8 \cdot 2209 \cdot 8,45 \cdot 10^{-5} = 194 \text{ кг}.$$

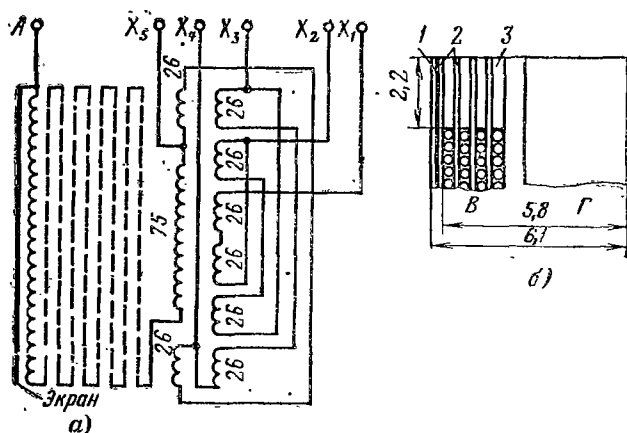


Рис. 10-16. Обмотка ВН трансформатора ТМ-630/35.

а — схема ответвлений (показаны числа витков частей обмотки); б — структура обмотки ВН [1 — экран; 2 — междуслойная изоляция; 3 — полоска электрокартона (бортик)].

Потери в обмотке основные по (7-4)

$$P_{\text{осн}} = 12,75 \cdot 1,23^2 \cdot 194 \frac{100}{105} = 3560 \text{ Вт}$$

(добавочными потерями в обмотке из круглого провода можно пренебречь).

Плотность теплового потока на поверхности обмотки

$$q = \frac{3560}{7,65} = 465 \text{ Вт/м}^2.$$

Расчет внутреннего перепада температуры в обмотке (по § 9-5)

Внутренний перепад температуры рассчитывается для наружной катушки Г, имеющей больший радиальный размер. Потери в 1 см³ объема обмотки по (9-11)

$$p = 2,71 \frac{1,23^2 \cdot 0,328^2}{(0,368 + 0,084) \cdot 0,368} 10^{-2} = 0,0264 \text{ Вт/см}^3.$$

Далее ведем расчет по (9-13), (9-12), (9-10) и (9-4).
Средняя условная теплопроводность обмотки

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{из}}}{0,7\alpha^{0,5}} = \frac{0,0017}{0,7 \cdot 0,122^{0,5}} = 0,0070 \text{ Вт/(см} \cdot ^\circ\text{C)};$$

$$\alpha = \frac{0,368 - 0,328}{0,328} = 0,122.$$

Средняя теплопроводность с учетом междуслойной изоляции

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{0,0070 \cdot 0,0017 (0,368 + 0,084)}{0,0070 \cdot 0,084 + 0,0017 \cdot 0,368} = 0,00443 \text{ Вт/(см} \cdot ^\circ\text{C)}.$$

Полный внутренний перепад температуры в катушке Γ

$$\Theta_0 = \frac{0,026 \cdot 3,17^2}{8 \cdot 0,00443} = 7,37^\circ\text{C}.$$

Средний внутренний перепад температуры

$$\Theta_{0,\text{ср}} = \frac{2}{2} 7,37 = 4,9^\circ\text{C}.$$

Перепад температуры на поверхности обмотки по (9-19)

$$\Theta_{0,\text{м}} = 0,285 \cdot 465^{0,6} = 11,4^\circ\text{C}.$$

Полный перепад температуры внутри и на поверхности обмотки

$$\Theta_{0,\text{м.ср}} = 4,9 + 11,4 = 16,3^\circ\text{C}.$$

Глава одиннадцатая

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ РАСЧЕТА НА ПАРАМЕТРЫ ТРАНСФОРМАТОРА

11-1. ВЛИЯНИЕ ИНДУКЦИИ НА МАССЫ АКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НЕКОТОРЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРАНСФОРМАТОРА

Обобщенный метод расчета трансформаторов, изложенный в § 3-4—3-6, может быть применен и к исследованию влияния, оказываемого изменением тех или иных исходных данных расчета — индукции в стержне B_c , принятого уровня потерь короткого замыкания P_k ,

коэффициента заполнения сечения стержня k_c и других на результаты расчета — основные размеры трансформатора, массы активных материалов, параметры холостого хода и другие данные трансформатора.

Выбор индукции в стержне магнитной системы B_c оказывает существенное влияние на размеры трансформатора и массы его активных материалов. Из выражений (3-29) и (3-30) следует, что $d \sim 1/\sqrt{B_c}$, т. е. диаметр стержня (а вместе с ним и другие размеры) уменьшаются с увеличением B_c при сохранении неизменного значения реактивной составляющей напряжения короткого замыкания u_p . Уменьшение размеров магнитной системы ведет к соответствующему уменьшению массы стали.

Напряжение одного витка обмотки $u_v \sim d^2 B_c$ при сохранении равенств (3-29) и (3-30) с изменением B_c остается неизменным. Вследствие этого число витков обмотки при заданном ее напряжении с увеличением B_c остается неизменным, а масса металла обмотки вследствие уменьшения диаметра ее витков уменьшается.

В целях получения наименьшей массы стали магнитной системы и металла обмоток индукцию в стержне B_c стремятся обычно выбирать возможно большей, считаясь, однако, с тем, что увеличение индукции ведет также к увеличению потерь и особенно тока холостого хода трансформатора. Для стали каждой марки, обладающей определенными удельными потерями, можно выбрать оптимальную индукцию, обеспечивающую получение достаточно малой массы стали и приемлемых потерь и тока холостого хода.

Рассмотрим выражение (3-46). Масса стали трансформатора

$$G_{ст} = \frac{A_1}{x} + (A_2 + B_2) x^2 + B_1 x^3.$$

Согласно (3-35), (3-36), (3-43) и (3-44)

$$A_1 \sim A^3; \quad B_1 \sim A^3; \quad A_2 \sim A^2; \quad B_2 \sim A^2.$$

Согласно выражению (3-30) $A \sim 1/\sqrt{B_c}$. Если для трансформатора, рассчитанного при индукции B_c , принять новое значение индукции $B_{c,н}$ и выбрать размеры трансформатора в соответствии с этим значением, то мас-

са стали магнитной системы будет равна:

$$G_{\text{ст.н}} = \left(\frac{A_1}{x} + B_1 x^3 \right) \sqrt{\frac{B_c^3}{B_{\text{с.н}}^3}} + (A_2 + B_2) \frac{B_c x^2}{B_{\text{с.н}}}. \quad (11-1)$$

Если при этом сохранить значение $\beta = x^4$, то размеры магнитной системы изменятся так, что останется неизменной реактивная составляющая напряжения короткого замыкания u_p . Из выражения для $G_{\text{ст.н}}$ следует, что с изменением индукции B_c часть массы стали будет изменяться пропорционально $B_c/B_{\text{с.н}}$, а часть — пропорционально $\sqrt{(B_c/B_{\text{с.н}})^3}$. На рис. 11-1 нанесены кривые изменения массы стали по обоим этим законам. Подробное исследование этого вопроса показало, что в действительности масса стали изменяется с изменением индукции B_c по средней кривой $G_{\text{ст}} = f(B_c)$, нанесенной на том же рисунке (см. график 1 рис. 11-1). При этом кривая действительного изменения массы стали остается практически справедливой для силовых трансформаторов в самом широком диапазоне мощностей и при любых значениях β . Пересчет массы стали $G_{\text{ст}}$, полученной при индукции B_c , к новому значению индукции $B_{\text{с.н}}$ может быть произведен по следующей формуле:

$$G_{\text{ст.н}} = G_{\text{ст}} \left(0,385 \frac{B_c}{B_{\text{с.н}}} + 0,615 \sqrt{\frac{B_c^3}{B_{\text{с.н}}^3}} \right). \quad (11-2)$$

Исследование влияния индукции B_c на параметры трансформатора потребовалось в то время, когда горячекатаная сталь в магнитных системах силовых трансформаторов в широких масштабах заменялась холоднокатаной и возникла проблема рационального выбора индукции B_c для новых марок стали. Поэтому за единицу массы (100%) на рис. 11-1 принята масса активной стали трансформатора, рассчитанного применительно к горячекатаной стали наиболее распространенной марки Э42-0,35 при индукции $B_c = 1,45$ Т.

Относительная стоимость активной стали при различных индукциях, положенных в основу расчета трансформатора, может быть выражена в виде $C_{\text{ст.н}} = \frac{c_{\text{ст.н}} G_{\text{ст.н}}}{c_{\text{ст}} G_{\text{ст}}}$, где $c_{\text{ст.н}}$ — цена одного килограмма стали новой марки; $c_{\text{ст}}$ — то же для стали прежней марки (для рис. 11-2 стали марки Э42-0,35); $G_{\text{ст.н}}/G_{\text{ст}}$ — отношение масс стали по кривой 1 рис. 11-1 или по формуле (11-2). Соответ-

ствующие кривые $C_{ст} = f(B_c)$ построены на рис. 11-2 для стали марки Э42-0,35, Э330-0,35 и Э330А-0,35.

Относительные потери холостого хода могут быть выражены в виде

$$P_{х.н} = \frac{k_{п.н} p_n G_{ст.н}}{k_{п.н} G_{ст}}$$

При этом удельные потери для новой марки стали p_n определяются для соответствующей индукции, а для прежней марки находятся для той индукции, при которой потери принимаются за 100% (для рис. 11-2 для стали марки Э42-0,35 при $B_c = 1,45$ Т). Коэффициент $k_{п.н}$ учитывает конструкцию магнитной системы (наличие косых и прямых стыков, добавочные потери в углах и т. д.) и для холоднокатаной стали может изменяться с изменением индукции. Коэффициент $k_{п.н}$ для горячекатаной стали (кривая потерь 1 на рис. 11-2) принят в соответствии с пояснениями к формуле (8-27).

Кривые зависимости $P_{х.н} = f(B_c)$ для холоднокатаных сталей марок Э330-0,35 и Э330А-0,35 рассчитаны при некоторых допущениях по формуле (8-32) для магнитной системы с шестью косыми стыками, многоступенчатой формой сечения ярма и стяжкой стержней бандажками.

Как видно из кривых, построенных на рис. 11-1 и 11-2, масса и стоимость стали трансформатора существенно уменьшаются с повышением индукции, однако общая стоимость стали марки Э330А-0,35 при индукциях 1,6—1,65 Т, даже при массе, уменьшенной на 12—15%, на 25—20% выше стоимости горячекатаной стали марки Э42-0,35, принятой за 100%. Это повышение стоимости частично компенсируется уменьшением массы и стоимости материала обмоток и в том случае, когда повышение

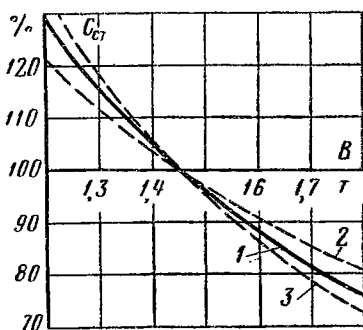


Рис. 11-1 Изменение массы стали с изменением индукции.

1 — действительное изменение массы стали $G_{ст} = f(B_c)$; 2 — изменение массы по закону $G \sim B_c / B_{c.н}$; 3 — изменение массы по закону $G \sim \sqrt{(B_c / B_{c.н})^3}$.

индукции допускается для новой марки стали с лучшими, чем у прежней марки, магнитными свойствами, также и существенным уменьшением потерь холостого хода.

Кривые, характеризующие изменение потерь холостого хода, сравнительно медленно повышаются с увеличением индукции, что позволяет сделать вывод о нецелесообразности уменьшения этих потерь путем снижения

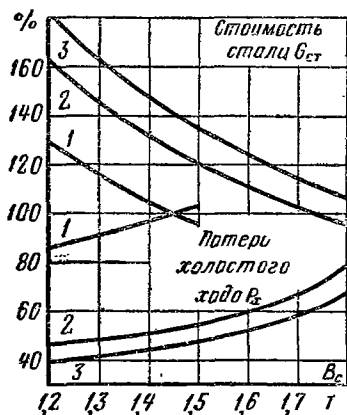


Рис. 11-2. Изменение стоимости стали $G_{ст}$ и потерь холостого хода P_x с изменением индукции B_c .

1 — сталь Э42-0,35; 2 — сталь Э330-0,35; 3 — сталь Э330А-0,35.

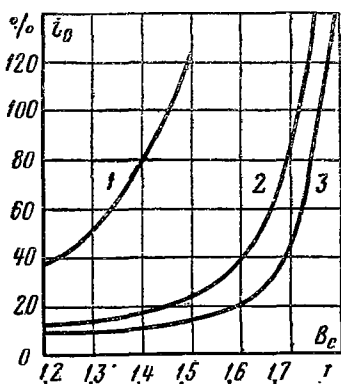


Рис. 11-3. Изменение тока холостого хода i_0 с изменением индукции B_c .

1 — сталь Э42-0,35; 2 — сталь Э330-0,35; 3 — сталь Э330А-0,35.

индукции. При необходимости снизить потери холостого хода целесообразно переходить на новую марку стали с меньшими удельными потерями или при неизменной индукции уменьшать общую массу стали путем уменьшения β в расчете диаметра стержня магнитной системы (см. § 3-6). Этот путь связан с увеличением массы металла обмоток.

Относительный ток холостого хода, аналогично потерям, может быть выражен в виде

$$i_{0н} = \frac{k_{т.в} q_n G_{ст.н}}{k_t q G_{ст}}$$

где общий коэффициент k_t , удельная намагничивающая мощность q и $G_{ст}$ определяются для прежней марки

стали (Э42-0,35) и индукции, принятой за 100% (1,45 Т); $k_{т.н.}$, q_n и $G_{ст.н.}$ находятся для новой марки стали при всех индукциях в выбранном диапазоне. На рис. 11-3 построены кривые относительного тока холостого хода для стали марок Э42-0,35, Э330-0,35 и Э330А-0,35. Эти кривые рассчитаны с некоторыми допущениями по формулам (3-58) и (8-44) для той же конструкции магнитной системы, для которой рассчитывались относительные потери, с учетом намагничивающей мощности, необходимой для стыков и добавочной мощности для углов магнитной системы.

Увеличение потерь холостого хода с увеличением индукции вследствие медленного подъема кривых не ставит определенных границ для выбора B_c . Ток холостого хода при некоторых значениях индукции начинает резко возрастать и поэтому является главным критерием при выборе рационального значения B_c . Именно поэтому для горячекатаной стали в свое время выбирали индукцию в пределах $B_c \leq 1,4 \div 1,45$ Т, а для современной холоднокатаной стали в большинстве трансформаторов ее ограничивают величиной $B_c \leq 1,6 \div 1,65$ Т. В трансформаторах мощностью менее 100 кВ·А, где в значительной степени сказывается наличие в магнитной цепи немагнитных зазоров, допускают значения B_c до 1,4—1,6 Т. При расчете трансформаторов очень больших мощностей 250 000—1 000 000 кВ·А в целях некоторого уменьшения их габаритов иногда допускают индукцию до 1,7 Т.

В трансформаторах с естественным воздушным охлаждением (сухих) вследствие худших по сравнению с масляными трансформаторами условий охлаждения магнитной системы допускают более низкие значения индукции.

Масса металла обмоток определяется по (3-50): $G_0 = C_1/x^2$. При сохранении β и, следовательно, x^2 : $G_0 \sim C_1$, или

$$G_0 \sim K_0 \frac{Sa^2}{k_d k_c^2 B_c^2 u_2 A^2}.$$

Из величин, входящих в это выражение, от B_c зависят только B_c и A . Поскольку $A \sim 1/\sqrt{B_c}$, то

$$G_0 \sim 1/B_c, \quad (11-3)$$

или

$$G_{o.n} = G_o B_c / B_{c.n}. \quad (11-4)$$

При этом трансформатор имеет заданные потери короткого замыкания P_K и заданное напряжение короткого замыкания u_K . Из-

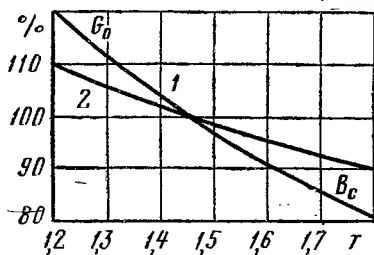


Рис. 11-4. Изменение массы металла обмоток с изменением индукции B_c .

1 — по формуле (11-4); 2 — по формуле (11-5).

менение массы обмоток с изменением индукции происходит за счет изменения среднего диаметра витка и его сечения при постоянном числе витков. Так, с увеличением индукции уменьшаются диаметр витка и масса обмоток, а уменьшение среднего диаметра витка позволяет при заданных потерях P_K увеличить плотность тока (3-43) и

дополнительно уменьшить массу обмоток.

При постоянстве плотности тока потери короткого замыкания могут быть снижены и связь массы металла обмоток с индукцией может быть найдена подобно предыдущему, если принять во внимание, что

$$u_a = \frac{K \Delta^2 G_o}{K_d \cdot 10S}$$

см. (3-9) и (3-48),

$$G_o \sim 1/\sqrt{B_c}. \quad (11-5)$$

Потери короткого замыкания при изменении индукции и постоянстве плотности тока изменяются пропорционально массе металла обмоток, т. е.

$$P_K \sim 1/\sqrt{B_c}. \quad (11-6)$$

На рис. 11-4 построены кривые G_o по (11-4) и (11-5), показывающие изменение массы металла обмоток в диапазоне индукций 1,2—1,8 Т.

Поскольку математические выражения для определения массы стали и металла обмоток в обобщенном виде для плоской и пространственной магнитных систем

одинаковы, все выводы, полученные в настоящем параграфе, относятся в одинаковой степени к трансформаторам с плоскими и пространственными магнитными системами.

Соотношения (11-2) — (11-6) и графики на рис. 11-1 — 11-4 для любого трансформатора позволяют с достаточной точностью оценить, как изменяются масса и стоимость стали магнитной системы и металла обмоток, потери холостого хода и короткого замыкания, а также ток холостого хода при изменении индукции, положенной в основу расчета трансформатора. На основании этих данных по методике, описанной в § 1-4, может быть оценена экономическая эффективность выбора того или иного значения индукции. При выборе индукции для трансформаторов различной мощности при обычном расчете можно ориентироваться данными табл. 2-9.

11-2. ВЛИЯНИЕ ПОТЕРЬ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ, КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПОЛНЕНИЯ k_c И ИЗОЛЯЦИОННЫХ РАССТОЯНИЙ НА МАССУ И СТОИМОСТЬ АКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ТРАНСФОРМАТОРА

Расчет отдельного трансформатора обычно проводится на базе существующей серии трансформаторов с определенными конструкциями магнитных систем и обмоток, с общей для всей серии конструкцией изоляции, с установленными изоляционными расстояниями, известными марками активных и изоляционных материалов и с общей технологией производства. В этом случае параметры короткого замыкания P_k и u_k , входящие в ряд параметров всей серии, коэффициент заполнения площади круга активным сечением стержня k_c , определяемый выбранной маркой стали и принятой технологией изготовления магнитной системы, и изоляционные расстояния главной изоляции обмоток, зависящие от конструкции главной изоляции и применяемых изоляционных материалов, по существу являются заданными для расчетчика.

При разработке новых серий обычно производится изменение как конструкций, так и технологии производства трансформаторов, применяются новые, более эффективные или экономичные магнитные, проводниковые и изоляционные материалы, улучшаются параметры трансформаторов серии. При этом обычно стремятся

уменьшить потери короткого замыкания P_K , увеличить коэффициент заполнения k_c и уменьшить не в ущерб электрической—прочности трансформатора изоляционные расстояния главной изоляции обмоток. Для оценки эффективности подобных изменений необходимо исследовать, как эти изменения отражаются на параметрах трансформатора, массах и стоимости его активных материалов.

Изменение потерь короткого замыкания трансформатора может быть произведено путем изменения плотности тока в обмотках и соответствующего изменения массы металла обмоток.

Массу металла обмоток, как было показано ранее (§ 11-1), можно определить по следующей формуле:

$$G_o = \frac{C_1}{x^2} = K_o \frac{S a^2}{k_d k_c^2 B_c^2 u_a A^2} \frac{1}{x^2}.$$

Из величин, входящих в это выражение, от потерь короткого замыкания P_K зависит только $u_a = P_K / 10 S$. Косвенно от P_K зависит параметр a , принимаемый постоянным для заданных потерь P_K , но изменяющийся при изменении P_K (см. § 3-5 и табл. 3-4). Таким образом,

$$G_o \sim C_1 \sim a^2 / P_K. \quad (11-7)$$

При относительно небольших изменениях P_K в пределах $\pm 20\%$ можно считать $a = \text{const}$ и пользоваться упрощенной формулой

$$G_o \sim 1 / P_K. \quad (11-8)$$

Изменение плотности тока с изменением P_K можно получить из (3-60)

$$\Delta = \sqrt{\frac{k_d P_K x^2}{K C_1}} \sim \sqrt{\frac{P_K P_K}{a^2}} = \frac{P_K}{a}, \quad (11-9)$$

или, если пренебречь изменением a ,

$$\Delta \sim P_K. \quad (11-10)$$

Зависимости между G_o , Δ и P_K графически изображены на рис. 11-5 сплошными линиями для упрощенных формул (11-8) и (11-10) и штриховыми линиями для точных формул (11-7) и (11-9). При этом за 100% при-

няты значения G_0 , Δ и P_k для любого исходного известного варианта. В связи с некоторым изменением сечения обмоток и необходимостью изменения площади окна магнитной системы при изменении P_k несколько изменится масса стали $G_{ст}$ — увеличивается с уменьшением P_k и уменьшается с его увеличением. Графики на рис. 11-5 показывают, что при изменениях P_k в пределах $\pm 20\%$ можно с успехом пользоваться упрощенными формулами. Из кривой 1 следует также, что уменьшение потерь короткого замыкания путем уменьшения плотности тока сопряжено с существенным увеличением массы металла обмоток.

Если в примере расчета трансформаторов ТМ-1600/35 с медными обмотками (см. § 3-6) принять неизменным значение β и придавать различные значения k_c ,

то при этом будут изменяться коэффициенты A , A_1 , B_1 и C_1 , а вследствие этого масса стали $G_{ст}$, потери холостого хода P_x , масса металла обмоток G_0 и стоимость активных материалов $C_{а.ч}$ при сохранении неизменных величин P_k и u_k . Результаты такого расчета при изменении k_c в пределах от 0,7 до 0,9 приведены в виде кривых на рис. 11-6. При этом за 100% условно приняты $G_{ст}$, P_x , G_0 и $C_{а.ч}$ при $k_c=0,8$.

Для трансформаторов других типов кривые на рис. 11-6 имеют точно такой же характер, но несколько отличаются числовыми значениями. Эти кривые совместно с табл. 2-1 и 2-6 позволяют сделать, например, следующие выводы.

При переходе (сталь с $\delta=0,35$ мм) с бумажной междупроводной изоляцией $k_3=0,85$ на лаковую $k_3=0,9$ масса стали и потери холостого хода снижаются примерно на 2,5%, масса обмоток на 5,5% и стоимость активных материалов на 4,0%. Дальнейший переход на двусторон-

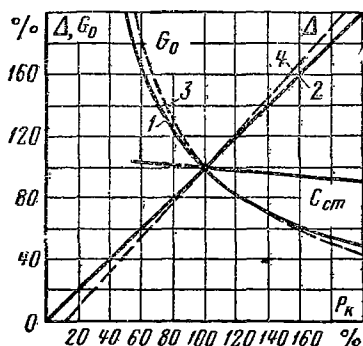


Рис. 11-5. Зависимость между потерями короткого замыкания P_k , массой металла обмоток G_0 и плотностью тока Δ .

1 и 2 — по формуле (11-8) и (11-10);
3 и 4 — по формулам (11-7) и (11-9).

нее жаростойкое покрытие ($k_3=0,95$) позволил получить дополнительное снижение массы стали около 2%, массы металла обмоток на 5% и стоимости активных материалов на 3,5%.

Применение в трансформаторах современных серий стали с толщиной листов 0,35 мм вместо 0,5 мм в старых сериях позволило существенно снизить потери холостого хода. При этом вместе с увеличением цены и стоимости стали произошло также уменьшение коэффициента заполнения k_c и некоторое дополнительное увеличение массы и стоимости активных материалов, а именно массы стали примерно на 1%, металла обмоток на 3%, стоимости активных материалов на 2%. В ближайшие годы в трансформаторостроении найдет применение сталь с толщиной листов 0,28—0,30 мм. Это также приведет к уменьшению коэффициента заполнения k_c и некоторому увеличению масс активных материалов.

Основные изоляционные расстояния главной изоляции обмоток — ширина канала между обмотками ВН и НН a_{12} , расстояние обмотки ВН до ярма l_0 и расстояние между обмотками соседних фаз a_{22} входят в формулы (3-36) и (3-44), определяющие массу активной части. Это влияние сказывается в большей степени в трансформаторах с более высоким номинальным напряжением обмоток ВН, а в трансформаторах с одинаковыми номинальными напряжениями — при относительно меньшей мощности.

При проектировании новых серий всегда стремятся уменьшить изоляционные расстояния путем применения новых материалов, обладающих повышенной электрической прочностью, и новых изоляционных конструкций или путем снижения испытательных напряжений. Во всех этих случаях представляется интересным оценить, в какой степени является эффективным то или иное мероприятие по уменьшению изоляционных расстояний.

Исследование этого вопроса проведено путем расчета по обобщенному методу нескольких вариантов трехфазного двухобмоточного трансформатора ТД-10000/110 мощностью 10 000 кВ·А с напряжением обмотки ВН 110 кВ. Расчет производился по методике, описанной § 3-5 и 3-6 при четырех вариантах изоляционных расстояний a_{12} , l_0 и a_{22} , составляющих 60, 80, 100 и 120% от соответствующих расстояний в серии трансформаторов с напряжением ВН 110 кВ. При расчете была принята

сталь марки Э330-0,35 по ГОСТ 802-58 при неизменных потерях короткого замыкания P_k и $u_k = 10,5\%$.

Изменение a_{12} отражается при расчете на коэффициентах A, A_1, A_2, B_1, B_2 и C_1 . Кроме того, коэффициенты A_2 и B_2 зависят также от l_0 и от a_{12} и a_{22} . Поэтому в результате расчетов были получены варианты трансформаторов с различными массами стали $G_{ст}$ и металла об-

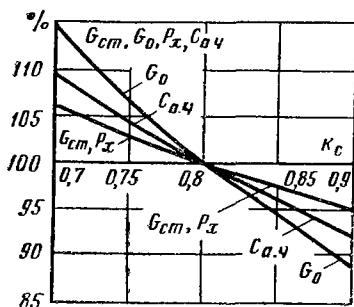


Рис. 11-6. Изменение массы стали $G_{ст}$, массы металла обмоток $G_о$, стоимости активных материалов $C_{а.ч}$ и потерь холостого хода с изменением коэффициента заполнения k_c ($P_k = \text{const}$, $u_k = \text{const}$).

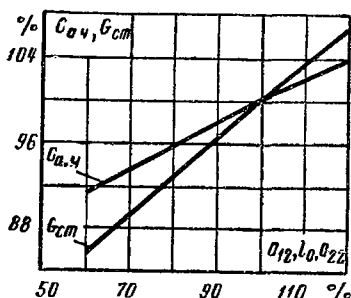


Рис. 11-7. Изменение массы стали $G_{ст}$ и стоимости активных материалов $C_{а.ч}$ с изменением изоляционных расстояний a_{12}, l_0, a_{22} ($P_k = \text{const}$; $u_k = \text{const}$; $G_о = \text{const}$).

моток $G_о$. При этом уменьшение изоляционных расстояний при сохранении одного значения β приводило к уменьшению диаметра d , снижению массы стали и некоторому увеличению массы металла обмоток.

Поскольку увеличение массы металла обмоток является весьма нежелательным, были подобраны такие значения β , при которых масса металла обмоток остается неизменной при всех вариантах изоляционных расстояний.

Результаты расчетов представлены в виде кривых на рис. 11-7. Снижение изоляционных расстояний на 20—40% по сравнению с существующими на трансформаторе ТД-10000/110 может привести к существенному снижению массы стали, а следовательно, потерь холостого хода на 7—15% и стоимости активных материалов на 4—8%. С увеличением мощности трансформатора при сохранении ВН 110 кВ эффект от уменьшения изоляционных расстояний будет соответственно уменьшаться.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЕРИЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ**12-1. ВЫБОР ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СЕРИИ**

В практике трансформаторостроения типом трансформатора принято называть образец конструкции трансформатора, характеризуемой совокупностью определенных признаков: назначением, числом фаз, частотой, мощностью, классом напряжения, числом обмоток, видом регулирования напряжения и видом охлаждения. При этом определении типа серий трансформаторов называется ряд типов трансформаторов определенного назначения и конструкции с одинаковым числом фаз, одной частоты, одного класса напряжения, с одним числом обмоток, с одним видом регулирования напряжения и одним видом охлаждения, различных мощностей, нарастающих по определенной шкале в ограниченном диапазоне.

Серия обычно характеризуется определенным уровнем и соотношением потерь холостого хода и короткого замыкания, определенными напряжением короткого замыкания и сочетаниями номинальных напряжений и схем и групп соединения обмоток ВН и НН. Все трансформаторы каждой серии обычно имеют одинаковые конструкции магнитных систем, обмоток и изоляции, изготавливаются из одинаковых активных и изоляционных материалов, с одинаковыми электромагнитными нагрузками этих материалов, по единой технологии.

Исходя из определения серии можно, например, так охарактеризовать одну из современных серий силовых трансформаторов: серия трехфазных силовых трансформаторов общего назначения, т. е. предназначенных для питания общих и местных электрических сетей, частоты 50 Гц, класса напряжения 35 кВ, двухобмоточных, с переключением ответвлений без возбуждения, с естественным масляным охлаждением, с мощностями по стандартной шкале ГОСТ 9680-61 от 1000 до 6300 кВ·А включительно. Уровень и соотношение потерь холостого хода и короткого замыкания трансформаторов этой серии, напряжения короткого замыкания, сочетания номинальных напряжений, схем и групп соединения обмоток

ВН и НН определяются ГОСТ 11920-73. Трансформаторы серии спроектированы с плоскими несимметричными шихтованными стержневыми магнитными системами из холоднокатаной рулонной стали марки Э330А-0,35 с косыми стыками в магнитной системе и прессовкой стержней и ярм бандажами, с винтовыми и катушечными обмотками из алюминиевого провода и с изоляцией обмоток маслосборного типа.

При проектировании отдельного трансформатора, входящего в известную серию, общие данные которой, т. е. шкалы мощностей и напряжений, а также параметры холостого хода и короткого замыкания известны проектировщику, задача расчетчика ограничивается получением наиболее простого и дешевого в производстве, требующего наименьшей затраты материалов и надежного во всех отношениях трансформатора. Решение этой задачи обычно требует более или менее подробной разработки нескольких (3—5) вариантов трансформатора, имеющих заданные параметры, но отличающихся различными соотношениями основных размеров. Выбор наилучшего варианта в этом случае может быть сделан по минимальной стоимости активных материалов трансформатора с учетом других требований производства и эксплуатации.

При разработке новых серий трансформаторов задача существенно усложняется. В этом случае параметры холостого хода и короткого замыкания должны также выбираться проектировщиком так, чтобы в результате разработки была получена серия наиболее экономичных трансформаторов. При этом добиваются получения не наиболее дешевого трансформатора, а наиболее дешевой трансформации, т. е. серии трансформаторов, требующих минимальной суммы первоначальных капитальных вложений в трансформаторные установки и текущих затрат на эксплуатацию этих установок за определенный промежуток времени.

Решение этой задачи для каждого типа трансформаторов серии требует рассмотрения большого числа вариантов расчета (20—25), отличающихся не только соотношением основных размеров, но и различными значениями уровня полных потерь и отношения потерь короткого замыкания к потерям холостого хода. Для каждого варианта помимо основных размеров, масс активных материалов и параметров должна быть опреде-

лена стоимость трансформатора. При проектировании новой серии обычно сохраняется стандартная шкала мощностей и редко варьируются напряжения короткого замыкания трансформаторов.

Сравнительная экономическая оценка полученных вариантов расчета производится по стоимости трансформации энергии с учетом возможности работы трансформатора при мощности, лежащей в пределах между его номинальной мощностью и ближайшей меньшей номинальной мощностью по шкале серии. На основании отбора наиболее экономичных вариантов определяются оптимальные значения уровня полных потерь и отношения потерь короткого замыкания к потерям холостого хода для каждого типа трансформаторов серии. После такого предварительного выяснения основных параметров трансформаторов серии производится детальная разработка оптимальных вариантов для каждого типа трансформатора. При этом учитываются такие требования производства, как необходимость унификации ряда деталей и узлов для разных типов трансформаторов, рациональный раскрой листовой или рулонной стали для магнитных систем, применение прогрессивной технологии обработки холоднокатаной стали и сборки остовов, возможность автоматизации изготовления и сборки отдельных узлов и т. д.

Расчет серий трансформаторов, так же как и расчет отдельных трансформаторов, может производиться путем выполнения ряда вариантов подробных расчетов, путем сочетания приближенных предварительных расчетов с последующей окончательной отработкой подробных расчетов выбранных оптимальных вариантов для каждого типа трансформатора или, наконец, путем проведения всех предварительных и окончательных расчетов на цифровых электронных вычислительных машинах.

При проектировании новой серии в современных условиях следует считать заданными:

- шкалу номинальных мощностей трансформаторов;
- шкалы номинальных напряжений ВН и НН;
- схемы и группы соединений обмоток;
- сочетания напряжений ВН и НН;
- частоту сети и число фаз трансформаторов.

Должны быть установлены также до начала проектирования серии: конструкция и материал изоляции ос-

новых изоляционных промежутков главной изоляции и соответствующие изоляционные расстояния (a_{01} , a_{12} , a_{22} , l_0 и т. д.). Эти данные могут быть приняты такие же, как в существующих сериях, или отработаны и экспериментально проведены специально для новой серии.

Должны быть выбраны и известны: марка и толщина листов активной стали, магнитные свойства стали; принципиальная конструкция магнитной системы трансформаторов серии (плоская или пространственная магнитная система, форма стыков, форма сечения ярм, метод прессовки стержней и ярм) и материал изоляции пластин, а следовательно, и коэффициент заполнения k_c ; конструкции обмоток ВН и НН.

В настоящее время должны быть также учтены нормализованные, принятые странами СЭВ шкалы диаметров стержней и чисел ступеней в сечении стержня.

Индукция в стержне B_c должна быть выбрана применительно к выбранной марке стали, и ее предельное значение определяется в первую очередь током холостого хода i_0 (§ 2-3 и § 11-1). Этот выбор обычно производится до начала проектирования. В случае необходимости варианты, рассчитанные для выбранной индукции, можно затем пересчитать на другие значения B_c по методике, изложенной в гл. 11.

Напряжение короткого замыкания u_k определяет ток короткого замыкания трансформатора. Необходимость ограничения этого тока для сохранения динамической и термической стойкости при коротком замыкании заставляет для трансформаторов различных типов устанавливать значения u_k не менее некоторых минимально допустимых значений. Для нормальной параллельной работы вновь выпускаемых трансформаторов с трансформаторами прежних серий желательно сохранять прежние значения u_k , что обычно и практикуется при проектировании новых серий.

Могут варьироваться в широких пределах для каждого трансформатора серии:

- отношение основных размеров β ,
- потери и ток холостого хода P_x и i_0 ,
- потери короткого замыкания P_k .

Поскольку β , P_x и i_0 жестко связаны между собой (гл. 3), достаточно в широких пределах варьировать β , чтобы при этом также широко варьировались P_x и i_0 .

Рекомендуемые пределы варьирования β

Система охлаждения	Металл обмоток	25—30 кВ А	1000— 6300 кВ·А	10 000— 80 000 кВ·А
Масляный	Медь	1,2—3,6	1,5—3,6	1,2—3,0
Масляный	Алюминий	0,9—3,0	1,2—3,0	1,2—3,0
Сухой	Медь	1,2—2,7	1,2—2,7	—
Сухой	Алюминий	0,8—2,1	0,8—2,1	—

Таким образом, при проектировании новой серии, необходимо достаточно широко варьировать β и P_k , чтобы охватить практически все реальные варианты каждого трансформатора серии.

Выбор варьируемых величин β и P_k для каждого реального трансформатора следует производить с таким расчетом, чтобы они охватывали зону несколько более широкую, чем зона реальных решений (по высоте стержня, плотности тока, механическим напряжением при коротком замыкании и т. д.). Рекомендации по выбору предельных β даны в табл. 12-1. Число вариантов в этих пределах можно выбрать по числу стандартных значений диаметра стержня, получаемых в выбранных пределах β .

Пределы варьирования P_k могут быть выбраны по уровню потерь, установленному ГОСТ. Можно рекомендовать пределы $P_k = 0,7 \div 1,2$ по ГОСТ технических требований к силовым трансформаторам разных габаритов. В этих пределах желательно исследование четырех-пяти вариантов P_k . Таким образом, общее число вариантов расчета каждого трансформатора составит 20—25.

Остальные исходные данные при расчете коэффициентов A , A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 , M , т. е. k , a и b для каждого трансформатора серии выбираются, как обычно, с учетом уровня P_k .

При предварительном расчете новой серии возможно также сравнение отдельных конструктивных решений, например, плоской и пространственной магнитной системы, оценка применения той или иной марки электротехнической стали или выбора той или иной величины индукции и т. п.

12-2. ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННОГО МЕТОДА К РАСЧЕТУ СЕРИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

После выбора исходных данных постоянных и варьируемых, расчет всех вариантов трансформатора проводится по методу, описанному в гл. 3. После выбора предельных значений β находятся соответствующие предельные диаметры

$$d_{\text{макс}} = A \sqrt[4]{\beta_{\text{макс}}} \text{ и } d_{\text{мин}} = A \sqrt[4]{\beta_{\text{мин}}},$$

а затем в пределах между $d_{\text{мин}}$ и $d_{\text{макс}}$ выбираются стандартные диаметры $d_1, d_2, d_3 \dots$ и находятся соответствующие значения β

$$\beta_1 = \left(\frac{d_1}{A}\right)^4; \quad \beta_2 = \left(\frac{d_2}{A}\right)^4;$$

$$\beta_3 = \left(\frac{d_3}{A}\right)^4 \dots$$

Дальнейший расчет всех вариантов трансформатора может быть произведен по обобщенному методу так, как это показано в гл. 3 для отдельного трансформатора с последующим построением графиков. При этом расчет трансформатора с заданным значением потерь короткого замыкания P_k по типу примера расчета § 3-6 становится одним из однородных элементов расчета трансформатора новой серии с варьированием заданного значения P_k . Такой расчет позволяет получить при малой затрате времени достаточно точные результаты для различных серий масляных и сухих трансформаторов с медными и алюминиевыми обмотками.

Обобщенный метод расчета трансформаторов базируется на теоретических положениях общей теории и теории проектирования трансформаторов. Наряду с этим в нем используются некоторые приближенные численные отношения, обозначенные в гл. 3 — k, a и b , принимаемые постоянными для каждого данного трансформатора. Эти приближенные отношения определяются по усредненным данным существующих серий трансформаторов. В тех случаях, когда новая серия существенно отличается от существующих, например, при значительном улучшении магнитных свойств стали, применении нового проводникового материала, изменении частоты или резкого изменения установленного уровня

потерь короткого замыкания P_k коэффициенты k , a и b , полученные для существующих серий, могут быть поставлены под сомнение. Хотя при таком изменении условий изменение этих коэффициентов можно заранее предугадать и уточнить, как это было, например, сделано при разработке методики расчета трансформаторов с алюминиевыми обмотками до расчета таких серий, ниже приводится уточненная методика определения постоянных коэффициентов для любой новой серии.

Радикальное изменение конструкции трансформатора, связанное с переходом от несимметричной плоской магнитной системы к симметричной пространственной системе приводит, как это видно из § 3-5, к некоторому изменению расчетных формул, относящихся к магнитной системе и определению потерь и тока холостого хода, но при сохранении стержневой конструкции трансформатора не требует изменения постоянных коэффициентов k , a и b .

Уточненный метод обобщенного расчета позволяет с достаточной точностью, путем последовательного приближения, на начальной стадии расчета определить радиальные размеры обмоток a_1 , a_2 и коэффициенты a и b с учетом мощности трансформатора, уровня потерь короткого замыкания и конструкции обмоток. Выбор основных исходных данных, в том числе и коэффициентов k , a и b , а также определение d_1 , d_2 , $d_3 \dots$ и коэффициента A в этом случае производится так же, как и при обычном расчете.

Дополнительно к обычному расчету определяются: для всех типов обмоток

$$D_1 = 4,44 \frac{\pi}{4} \cdot 10^{-4} f B_c k_c; \quad (12-1)$$

при $f = 50$ Гц

$$D_1 = 174,27 \cdot 10^{-4} B_c k_c; \quad (12-2)$$

для медных обмоток

$$D_2 = \frac{0,746 k_d}{S}; \quad (12-3)$$

для алюминиевых обмоток

$$D_2 = \frac{0,463 k_d}{S}. \quad (12-4)$$

Коэффициенты D_1 и D_2 не зависят от d , β и P_K и являются общими для всех вариантов расчета данного трансформатора.

При расчете радиальных размеров обмоток первоначально определяется активное сечение, т. е. полное сечение металла каждой обмотки в окне Π и затем учитывается высота обмотки l и ее коэффициенты заполнения в осевом и радиальном направлениях с учетом изоляции провода, междувитковой, междуслойной и междукатушечной изоляции и охлаждающих каналов.

Из (12-1) нетрудно получить э. д. с. одного витка,

$$u_B = D_1 d^2. \quad (12-5)$$

Тогда число витков обмотки

$$w = \frac{U' k_{\text{пер}}}{u_B} = \frac{U' k_{\text{пер}}}{D_1 d^2}, \quad (12-6)$$

где U' — номинальное напряжение обмотки одного стержня, В.

Коэффициент $k_{\text{пер}}$ учитывает наличие регулировочных витков в обмотках ВН и СН. Для обмотки НН $k_{\text{пер}} = 1,0$.

Средняя плотность тока в обмотках, А/мм², может быть найдена из (7-10), (12-3) и (12-4) с учетом того, что $d_{12} = ad$

$$\Delta = D_2 \frac{D_1 d}{a} P_K. \quad (12-7)$$

Активное сечение обмотки (сечение металла), см²,

$$\Pi = \frac{I' w}{\Delta} k_{\text{пер}} \cdot 10^{-2} = \frac{I' U' a k_{\text{пер}}}{D_1 d^2 D_2 D_1 d P_K} 10^{-2};$$

$$\Pi = \frac{a S' k_{\text{пер}}}{D_1^2 D_2 d^3 P_K} \cdot 10, \quad (12-8)$$

где I' , S' — ток и мощность обмотки одного стержня, соответственно А и кВ·А.

Радиальный размер обмотки a_0 зависит от ее конструкции, полного активного сечения Π , осевого размера l , толщины изоляции провода, наличия дополнительной изоляции, например между слоями (общее сечение изоляции $\Pi_{\text{и}}$), взаимного расположения витков, наличия и размеров осевых и радиальных каналов внутри обмот-

ки (общее сечение каналов Π_k). Все перечисленные признаки в обмотках различных типов сочетаются по-разному. В общем виде радиальный размер обмотки может быть найден так:

$$a_0 = \frac{\Pi + \Pi_k + \Pi_n}{l} . \quad (12-9)$$

При детальном рассмотрении обмоток различных типов удобно сечение охлаждающих и изоляционных каналов внутри обмотки определять и учитывать по их размерам. Учет сечения изоляции удобно вести частично по фактическим размерам, частично путем введения коэффициентов. Длина горизонтальных (радиальных) и вертикальных (осевых) охлаждающих каналов определяется соответствующими размерами обмотки a_0 и l , а их ширина выбирается из условия обеспечения надлежащего охлаждения обмотки (§ 9-5) и непосредственно связывается с радиальным a_0 или осевым l размером обмотки.

Нормальный размер (ширина осевого охлаждающего канала в многослойной обмотке масляного трансформатора между двумя частями обмотки для мощностей 10—630 кВ·А может быть принят по формуле

$$a_k = 0,4 + 0,004l, \quad (12-10)$$

для мощностей от 1000 кВ·А и более

$$a_k = 0,01l. \quad (12-10')$$

В обмотках сухих трансформаторов

$$a_k = (0,015 \div 0,020) l. \quad (12-10'')$$

Размеры радиальных каналов в обмотках могут быть выбраны применительно к мощности трансформатора.

Детальное исследование размещения обмоток разных конструкций в окне трансформатора позволило для масляных трансформаторов получить относительно несложные выражения для определения радиального размера обмотки при расчете по обобщенному методу, приведенные в табл. 12-2—12-4 в соответствии с рис. 12-1 и 12-2. В первой строке каждой таблицы дано общее выражение, справедливое вообще для обмотки данного типа, а в последующих строках — упрощенные выражения, учи-

ывающие реальные охлаждающие каналы для трансформаторов различных мощностей и классов напряжения.

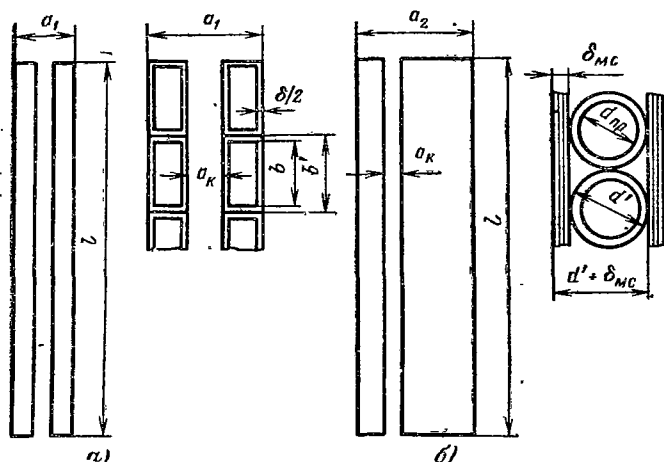


Рис. 12-1. Обозначение размеров для цилиндрических обмоток из прямоугольного (а) и круглого (б) провода.

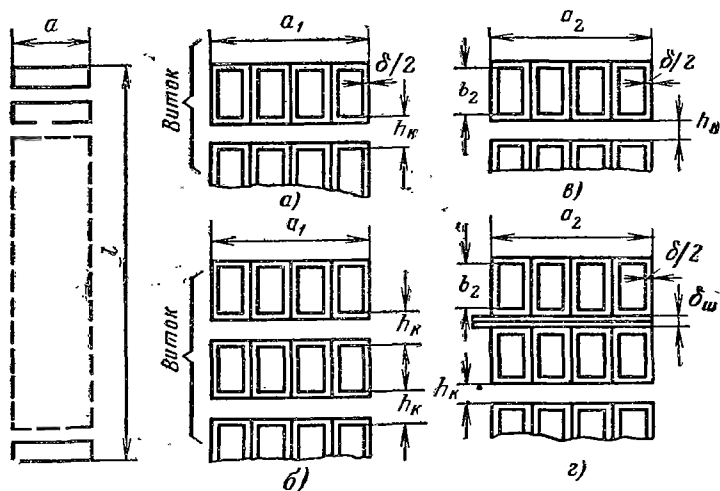


Рис. 12-2. Обозначение размеров для обмоток винтовых одноходовых (а) и двухходовых (б), непрерывных катушечных с одинарными (в) и двойными (г) катушками.

**Расчет радиальных размеров обмоток НН и ВН
при проектировании новых серий трансформаторов**

10—630 кВ·А медные и алюминиевые обмотки		
	Обмотки НН — цилиндрические одно- и двухслойные из прямоугольного провода 400, 525 и 630 В	Обмотки ВН и (НН) — многослойные цилиндрические из круглого провода 6, 10 и 35 кВ
Общая формула	$a_1 = (0,4 + 2\delta) + 0,004 \frac{\pi ad}{\beta} + \frac{(U'_1 + 2D_1 d^2) S' k_{\text{ос}} k_{\text{раз}} 10}{U'_1 \pi A^4 D_1^2 D_2 P_{\text{к}}}$	$a_2 = 0,4 + 0,004 \frac{\pi ad}{\beta} + \frac{S' k_{\text{рег}}'_{\text{пл}} 10}{\pi A^4 D_1^2 D_2 P_{\text{к}}}$
10—40 кВ·А	$a_1 = 0,2 + 3,5 \frac{(U'_1 + 2D_1 d^2) S'}{U'_1 A^4 D_1^2 D_2 P_{\text{к}}}$	$a_2 = 3,34 \frac{S' k_{\text{пл}}}{A^4 D_1^2 D_2 P_{\text{к}}}$
63—400 кВ·А	$a_1 = 0,6 + 3,5 \frac{(U'_1 + 2D_1 d^2) S'}{U'_1 A^4 D_1^2 D_2 P_{\text{к}}}$	$a_2 = 0,5 + 3,34 \frac{S' k_{\text{пл}}}{A^4 D_1^2 D_2 P_{\text{к}}}$
630 кВ·А	$a_1 = 0,7 + 3,5 \frac{(U'_1 + 2D_1 d^2) S'}{U'_1 A^4 D_1^2 D_2 P_{\text{к}}}$	$a_2 = 0,6 + 3,34 \frac{S' k_{\text{пл}}}{A^4 D_1^2 D_2 P_{\text{к}}}$

Примечания: 1. Размеры обмоток a_1 и a_2 в сантиметрах.

2. Общие формулы действительны для масляных и сухих трансформаторов. Формулы для определенных мощностей — только для масляных трансформаторов.

3. До мощности 40 кВ·А осевого канала нет; при мощности 63—400 кВ·А осевой канал 0,5 см; при мощности 630 кВ·А осевой канал 0,6 см.

Расчет радиальных размеров обмоток НН и ВН при проектировании новых серий трансформаторов

1000—6300 и 10 000—63 000 кВ·А		Обмотки ВН (СН и НН) — непрерывные катушечные. Радиальные каналы между всеми катушками 6, 10 и 35 кВ (см. прим. 3)	
Общая формула	$a_1 = \frac{S' k_{\text{рад}} k_{\text{раз}} 10}{D_1^2 D_2 P_{\kappa} \left(\frac{\pi A^4}{\omega_1 + 4} - \frac{h_{\kappa} d^3}{a} \right) \omega_1}$	$a_2 = \frac{S' k_{\text{рег}} k_{\text{рад}} k_{\text{раз}} 10 \left(1 + \frac{h_{\kappa} + \delta}{b_2} \right)}{D_1^2 D_2 P_{\kappa} \pi A^4}$	
1000—25 000 кВ·А	$a_1 = \frac{S' k_{\text{рад}} k_{\text{раз}} 10}{D_1^2 D_2 P_{\kappa} \left(\frac{\pi A^4}{\omega_1 + 4} - 0,55 \frac{d^3}{a} \right) \omega_1}$	$a_2 = \frac{S' k_{\text{рег}} k_{\text{рад}} k_{\text{раз}} 10 \left(1 + \frac{0,55}{b_2} \right)}{D_1^2 D_2 P_{\kappa} \pi A^4}$	
40 000—63 000 кВ·А	$a_1 = \frac{S' k_{\text{рад}} k_{\text{раз}} 10}{D_1^2 D_2 P_{\kappa} \left(\frac{\pi A^4}{\omega_1 + 4} - 0,65 \frac{d^3}{a} \right) \omega_1}$	$a_2 = \frac{S' k_{\text{рег}} k_{\text{рад}} k_{\text{раз}} 10 \left(1 + \frac{0,65}{b_2} \right)}{D_1^2 D_2 P_{\kappa} \pi A^4}$	

Примечания: 1. Размеры обмоток a_1 и a_2 , в сантиметрах.

2. Радиальные каналы до 25 000 кВ·А 0,5 см, выше 0,6 см.

3. Для напряжения 110 кВ числитель дроби в скобках 0,65 и 0,75 (изоляция провода 0,14—0,15 см на две стороны).

4. Общие формулы действительны для масляных и сухих трансформаторов. Формулы для определенных мощностей — только для масляных трансформаторов.

Расчет радиальных размеров обмоток НН и ВН при проектировании новых серий трансформаторов

	Обмотки НН—винтовые двухходные 400, 525, 690, 3000, 6000 и 10 000 В	Обмотки ВН (СН и НН) — непрерывные спирально-катушечные. Радиальные каналы через две катушки (катушки вдвоены) 6, 10, 35 и 110 кВ (см. прим. 4)
Общая формула	$a_1 = \frac{S' k_{\text{рад}} k_{\text{раз}} 10}{D_1^2 D_2 P_K \left[\pi A^4 - \frac{w_1 d^3}{a} (2h_K - 2\delta) \right]}$	$a_2 = \frac{S' k_{\text{рег}} k_{\text{рад}} k_{\text{раз}} \cdot 10 \left(1 + \frac{h_K + 2\delta + \delta_{\text{ш}}}{2b_2} \right)}{D_1^2 D_2 P_K \pi A^4}$
1000—25 000 кВ · А	$a_1 = \frac{S' k_{\text{рад}} k_{\text{раз}} 10}{D_1^2 D_2 P_K \left(\pi A^4 - 1,1 \frac{w_1 d^3}{a} \right)}$	$a_2 = \frac{S' k_{\text{рег}} k_{\text{рад}} k_{\text{раз}} 10 \left(1 + \frac{0,4}{b_2} \right)}{D_1^2 D_2 P_K \pi A^4}$
40 000—63 000 кВ · А	$a_1 = \frac{S' k_{\text{рад}} k_{\text{раз}} 10}{D_1^2 D_2 P_K \left(\pi A^4 - 1,3 \frac{w_1 d^3}{a} \right)}$	$a_2 = \frac{S' k_{\text{рег}} k_{\text{рад}} k_{\text{раз}} 10 \left(1 + \frac{0,45}{b_2} \right)}{D_1^2 D_2 P_K \pi A^4}$

Примечания: 1. Размеры обмоток a_1 и a_2 в сантиметрах.

2. Общие формулы действительны для масляных и сухих трансформаторов формулы для определенных мощностей — только для масляных трансформаторов.

3. Радиальные каналы до 25 000 кВ · А 0,5 см, выше 0,6 см.

4. Для напряжения 110 кВ числитель дроби в скобках 0,5 и 0,55 (изоляция провода на две стороны 0,14—0,15 см).

При использовании в расчете этих выражений для отдельных конструкций обмоток следует дополнительно определить следующие величины.

Для обмоток ВН многослойных цилиндрических из круглого провода сечение витка, мм²,

$$P_2 = \frac{k_2' a}{D_2 D_1 d P_k}. \quad (12-11)$$

Затем по полученному P_2 определяется коэффициент площади $k_{пл}$, учитывающий отношение площади сечения обмотки к общей площади сечения металла проводов с учетом междуслойной изоляции

$$k_{пл} = \frac{d' (d' + \delta_{мсл})}{P_2} = \frac{4d' (d' + \delta_{мсл})}{\pi d_{гр}^2}. \quad (12-12)$$

Обозначения приведены на рис. 12-1, б. Диаметр провода выбирается по сортаменту.

Для винтовых обмоток по (12-6) определяется число витков w_1 .

Для обмоток ВН (и НН) непрерывных катушечных определяется плотность тока Δ и осевой размер провода b_2 для выбранной плотности теплового потока на поверхности обмоток q и Δ по (12-7):

для медного провода

$$b_2 \leq q/107\Delta^2, \quad (12-13)$$

для алюминиевого провода

$$b_2 \leq q/172\Delta^2. \quad (12-14)$$

Для обмоток различных типов должны быть найдены соответствующие коэффициенты заполнения:

обмотки НН цилиндрические из прямоугольного провода (10—630 кВ·А) — коэффициент заполнения в осевом направлении, т. е. отношение размера изолированного провода к неизолированному $k_{ос}$ и коэффициент, учитывающий разгон при намотке провода $k_{раз}$;

обмотки ВН цилиндрические многослойные из круглого провода (10—630 кВ·А) — коэффициент заполнения площади обмотки $k_{пл}$;

обмотки НН винтовые одно- и двухходовые (1000—63 000 кВ·А) — коэффициент заполнения обмотки в радиальном направлении $k_{рад}$, определяемый аналогично

$k_{ос}$, и коэффициент размещения $k_{раз}$, определяющий размещение обмотки с учетом дискретности сортамента обмоточного провода и опрессовки картона в обмотках после сушки;

обмотки ВН и НН непрерывные катушечные (1000—63 000 кВ·А), аналогично обмоткам винтовым — два коэффициента $k_{рад}$ и $k_{раз}$. Для обмоток ВН и СН всех трансформаторов следует ввести также коэффициент, учитывающий наличие регулировочных витков $k_{рег}$ — от 1,05 при ПБВ до 1,10—1,16 при РПН.

Ориентировочные значения коэффициентов для современного сортамента провода приведены в табл. 12-5.

Таблица 12-5

Сводная таблица коэффициентов для обмоток из прямоугольного провода

Обмотки		Мощность, кВ·А	Класс напряжения, кВ	$k_{ос}$	$k_{рад}$	$k_{раз}$
Тип	Назначение					
Цилиндрические од- и двухслойные	III	10—630	До 1	1,07	—	1,06
Винтовые	НН	1000—63 000	1—10	—	1,2	1,10
Непрерывные катушечные	ВН (и НН)	1000—6300	6 и 10	—	1,2	1,10
			35	—	1,3	1,10
Непрерывные катушечные	ВН и СН (НН)	10 000—30 000	6, 10 и 35	—	1,2	1,10
			110		1,65	1,10

После определения a_1 и a_2 следует уточнить:

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}; \quad (12-15)$$

$$a = \frac{d + 2a_{с1} + 2a_1 + a_{12}}{d}; \quad (12-16)$$

$$b = 2a_2/d \quad (12-17)$$

и затем, подставив полученные a_p , a , b в основные расчетные формулы, вести расчет в обычном порядке. Одна такая ступень последовательного приближения дает достаточно точные результаты.

Необходимо иметь в виду, что для всех вариантов диаметра стержня d и потерь короткого замыкания P_k получаются несколько различающиеся значения a_1 и a_2 . Вследствие этого для всех вариантов получаются различными также a_p , a , b и все коэффициенты A , A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 и M , значения β , размеры и массы активных материалов рассчитываемого трансформатора. Расчет 20—25 вариантов каждого трансформатора серии является достаточно трудоемкой работой. Последовательное уточнение радиальных размеров обмоток, относительно мало изменяющихся от одного варианта к другому, и их использование в дальнейшем расчете требуют точности расчетов до четвертого знака, которую не может обеспечить использование логарифмической линейки. Для получения достаточной скорости и точности расчетов рекомендуется пользоваться клавишной счетной цифровой машиной. При расчете новой серии, содержащей большое число типов трансформаторов, при необходимости варьировать также другие исходные данные (например, B_c , k_c и т. д.) система расчетов может быть запрограммирована для расчета на цифровой электронно-вычислительной машине.

12-3. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ПРИ РАСЧЕТЕ СЕРИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

При проектировании новой серии для каждого типа трансформатора рассчитывается ряд вариантов, отличающихся основными размерами, массами активных материалов, стоимостью и параметрами холостого хода и короткого замыкания. Выбор оптимального варианта может быть произведен с учетом различных критериев, определяющих целесообразность и возможность реального выполнения того или иного варианта.

Экономическая оценка рассчитанных вариантов каждого типа трансформаторов серии считается важнейшим критерием при выборе оптимального варианта. Экономическое сравнение различных вариантов производится путем сравнения приведенных годовых затрат Z (§ 1-4), определяемых для всех вариантов с учетом капитальных вложений в трансформаторную установку и годовых издержек на ее эксплуатацию. Оптимальным считается вариант с минимальными годовыми затратами.

Критерий экономической оценки, будучи наиболее важным, является в то же время по ряду причин не единственным. При расчете трансформаторов многих типов годовые затраты Z сравнительно

мало изменяются с изменением диаметра стержня трансформатора d или потерь короткого замыкания P_k , и различные варианты, отличающиеся по затратам Z на 0,5—1,0%, получаются в экономическом отношении практически равноценными. Некоторые варианты, являясь экономически целесообразными, могут оказаться неприемлемыми вследствие недостаточной нагревостойкости обмоток, недостаточной механической прочности обмоток при коротком замыкании или по другим причинам. Поэтому при выборе оптимального варианта, в первую очередь по экономической оценке, следует учитывать также другие критерии.

Нагрев обмотки трансформатора определяется конструкцией обмотки и потерями в ней, отнесенными к единице поверхности охлаждения. Поскольку плотность потерь на поверхности обмотки прямо связана с плотностью тока и размером провода обмотки (§ 7-1), а превышение температуры обмоток масляных и сухих трансформаторов над воздухом ограничено ГОСТ 11677-75 (для масляных трансформаторов 65°C и для сухих с изоляцией класса А 60°C), условие допустимого нагрева обмоток силовых трансформаторов может быть обеспечено при плотностях тока, не превышающих в масляных трансформаторах 4,5 А/мм² для медных и 2,7 А/мм² для алюминиевых обмоток, а в сухих трансформаторах с изоляцией класса А соответственно 2,0 и 1,8 А/мм². Эти предельные плотности тока будут создавать дополнительные ограничения при выборе оптимального варианта.

Механическая прочность обмоток при коротком замыкании ограничивает выбор вариантов предельными механическими растягивающими напряжениями в проводе обмоток $\sigma_p \leq 60$ МПа для медных и 25 МПа для алюминиевых обмоток. В некоторых случаях ограничиваются отдельные размеры трансформатора. Осевой размер обмотки l может быть ограничен в трансформаторах мощностью 40 000—63 000 кВ·А по условиям перевозки по железной дороге. В трансформаторах мощностью 160—6300 кВ·А этот размер иногда ограничивается предельной устойчивостью стержня трансформатора при продольном изгибе в процессе сборки (при малых значениях β) вследствие большой высоты стержня при его малом диаметре.

Выбор оптимального варианта должен сопровождаться также анализом других данных трансформатора потому, что может, например, оказаться, что относительно малое уменьшение годовых затрат достигается в некоторых случаях существенным увеличением стоимости трансформатора, увеличением расхода цветных металлов, увеличением общей массы трансформатора и т. д.

После выбора оптимального варианта для каждого трансформатора серии необходимо проверить экономичность работы всех трансформаторов серии с учетом возможности работы каждого трансформатора в пределах между его номинальной мощностью и ближайшей меньшей номинальной мощностью по шкале серии. После такой проверки в случае необходимости проводится корректировка выбранных вариантов и затем производится детальная расчетная и конструктивная разработка всех трансформаторов серии.

На рис. 12-3 в качестве примера нахождения оптимального решения графически показаны результаты расчета одного трансформатора из новой серии сухих трансформаторов. Расчет этого трансформатора был выполнен для пяти вариантов диаметра стержня d_1 , d_2 , d_3 , d_4 и d_5 из нормализованного ряда и для пяти вариантов потерь короткого замыкания P_{k1} , P_{k2} , P_{k3} , P_{k4} и P_{k5} . Вместе с вариан-

циями диаметра варьировались также потери холостого хода. Во всех вариантах сохранялись неизменными индукция B_0 и напряжение короткого замыкания u_k . При обозначениях, принятых на рисунке:

$$d_1 < d_2 < d_3 < d_4 < d_5;$$

$$P_{K1} < P_{K2} < P_{K3} < P_{K4} < P_{K5}.$$

По минимальным приведенным затратам следовало бы выбрать вариант d_3 и P_{K5} или вариант d_4 и P_{K5} , однако оба эти варианта не могут быть выбраны, так как лежат в зоне, ограниченной

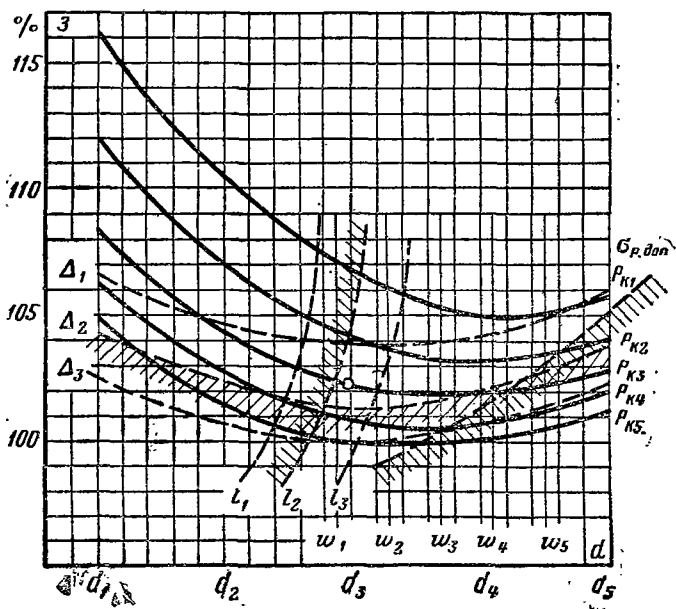


Рис. 12-3. Выбор диаметра стержня d и уровня потерь короткого замыкания P_K по приведенным затратам Z , плотности тока Δ , высоте обмотки l , числу ее витков w_1 и механическим напряжениям в обмотке σ_r .

кривой предельно допустимой плотности тока Δ ($\Delta_1 < \Delta_2 < \Delta_3$). Высота обмотки l , определяющая высоту стержня, в данном случае ограничена устойчивостью стержня при насадке обмоток. Предельная высота обмотки l принята не более пятикратного значения диаметра стержня.

На рис. 12-3 кривая l_2 ($l_1 > l_2 > l_3$) ограничивает выбор возможных вариантов областью, лежащей справа от этой кривой.

Механические напряжения в проводе обмоток при коротком замыкании не должны превосходить допустимого предела. В данном

случае кривая σ_r налагает запрет на выбор вариантов, лежащих правее и ниже этой кривой.

При расчете трансформаторов мощностью 10—6300 кВ·А при стандартном напряжении обмотки НН 400, 525 или 690 В приходится считаться с относительно малым числом витков этой обмотки. Например, при выборе d_3 и w_1 (рис. 12-3) индукция в стержне B_c будет несколько ниже расчетной, при выборе d_4 и w_4 — выше ($w_1 > w_2 > w_3 > w_4 > w_5$).

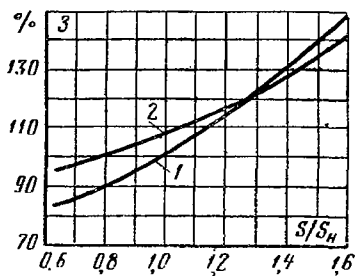


Рис. 12-4. Изменение приведенных затрат Z с изменением нагрузки S трансформатора для $P_{к5}$ (1) и $P_{к1}$ (2) ($P_{к5} > P_{к1}$).

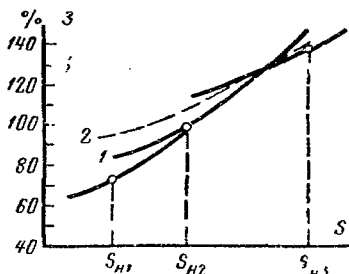


Рис. 12-5. Проверка экономичности работы трансформатора при различных нагрузках.

Исходя из вышесказанных соображений, для рассмотренного примера следует выбрать вариант d_3 и $P_{к3}$ как отвечающий всем поставленным условиям и ограничениям. При проектировании серии подобным образом должен быть выбран оптимальный вариант для каждого типа трансформатора.

Зависимость приведенных затрат Z от выбранного диаметра стержня и уровня потерь короткого замыкания, показанная на рис. 12-3, справедлива для нагрузки трансформатора номинальным током. При использовании трансформатора с мощностью ниже или выше номинальной затраты будут изменяться. Это показано на рис. 12-4, где для того же трансформатора построены две из 25 возможных характеристик зависимости затрат Z от нагрузки, изменяющейся от 0,63 до 1,6 номинальной мощности S_N . Кривые рассчитаны для оптимального диаметра d_3 и потерь короткого замыкания $P_{к1}$ и $P_{к5}$. Из рис. 12-4 видно, что положение и наклон кривой $Z=f(S)$ изменяются при изменении P_k . Большим значениям P_k соответствует больший наклон характеристик.

При выборе трансформатора для новой установки с известной мощностью обычно выбирают ближайшую по стандартной шкале большую мощность трансформатора. При этом экономичная работа трансформаторов должна быть обеспечена не только при их номинальных мощностях, но также при любых других допустимых для них мощностях в диапазоне шкалы мощностей серии. Это условие может быть соблюдено в том случае, когда характеристики $Z=f(S)$ для трансформаторов серии составляют общую достаточно плавную кривую без больших скачков. Такие характеристики для рассчитанного трансформатора и двух ближайших по номинальной

мощности показаны на рис. 12-5. Из этого рисунка видно, что для рассчитанного трансформатора из двух характеристик, показанных на рис. 12-4, оптимальной является характеристика I с большими потерями P_k и большим наклоном.

Такая проверка обеспечения экономичной работы трансформаторов в эксплуатации должна быть проведена для всей серии. Окончательный выбор оптимальных вариантов расчета должен производиться из числа вариантов, полученных для каждого трансформатора из графиков типа приведенных на рис. 12-3 с последующей корректировкой по характеристикам $3=f(S)$ трансформаторов всей серии по типу характеристик на рис. 12-5. Наиболее вероятно, что оптимальными для серии будут оптимальные варианты для каждого трансформатора, однако в некоторых случаях возможны отклонения от этого правила.

12-4. ПРИМЕР РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРА НОВОЙ СЕРИИ

Полный расчет ряда вариантов трансформатора новой серии, даже при выполнении по обобщенному методу, имеет достаточно большой объем. Поэтому ниже приводятся только основные этапы такого расчета и его основные результаты. Выполняется расчет трансформатора того же типа, что и в примере расчета в § 3-6.

Задание на проект трансформатора новой серии типа ТМ-1600/35

Мощность трансформатора $S=1600$ кВ·А; число фаз $m=3$; частота $f=50$ Гц; номинальные линейные напряжения обмоток: ВН $U_2=35\,000 \pm (2 \times 2,5\%)$, В; НН $U_1=690$ В; схема и группа соединений $Y/Y-0$; охлаждение — естественное масляное; режим работы — продолжительный; установка наружная; напряжение короткого замыкания $u_k=6,5\%$; обмотки из алюминиевого провода.

Потери короткого замыкания P_k , потери и ток холостого хода P_x и i_0 должны быть установлены в процессе расчета так, чтобы для трансформатора были обеспечены минимальные затраты $З$.

Расчет трансформатора

Из примера расчета в § 3-6 находим основные электрические параметры: $S'=533,3$ кВ·А, номинальные токи — ВН $I_2=26,4$ А и НН $I_1=1339$ А; фазные токи равны номинальным линейным токам; фазные напряжения обмоток — ВН $U_{2\phi}=20\,207$ В и НН $U_{1\phi}=339$ В; испытательные напряжения — ВН $U_{исп}=85$ кВ и НН $U_{исп}=5$ кВ.

Выбираются четыре варианта потерь короткого замыкания $P_k=14\,000, 16\,000, 18\,000$ и $20\,000$ Вт, т. е. соответственно: 0,78; 0,89; 1,00 и 1,11 потерь по ГОСТ 11920-73.

Для значений β выбирается диапазон от $\beta_{мин}=1,2$ до $\beta_{макс}=3,0$ (табл. 12-1). Для потерь короткого замыкания от 14 000 до 20 000 Вт и активной составляющей напряжения короткого замыкания — от 0,775 до 1,125% находим реактивную составляющую $u_p=6,4\%$.

Согласно указаниям § 2-2 выбираем трехфазную стержневую магнитную систему по типу рис. 2-6, б с косыми стыками на крайних стержнях (рис. 2-18, а). Материалом магнитной системы служит холоднокатаная текстурованная рулоная сталь марки Э330А с толщиной листов 0,35 мм. Индукция в стержне $B_c=1,60$ Т (по табл. 2-9). Форма сечения яра повторяет форму сечения стержня,

коэффициент усиления ярма $k_{\text{я}}=1,01$; индукция в ярме $B_{\text{я}}=B_{\text{с}}/1,01=1,584$ Т. Удельные потери в стали $p_{\text{с}}=1,32$ Вт/кг; $p_{\text{я}}=1,28$ Вт/кг; удельная намагничивающая мощность $q_{\text{с}}=2,80$ В·А/кг; $q_{\text{я}}=2,65$ В·А/кг (см. § 8-2 и § 8-3).

Предварительно принимаем: в сечении стержня восемь ступеней, стержень без каиалов, прессовка стержней бандажами из стеклоленты и ярм стальными полубандажами $k_{\text{кр}}=0,925$ (табл. 2-1); междулистная изоляция — жаростойкое покрытие с однократной лакировкой $k_{\text{з}}=0,93$ (табл. 2-6);

$$k_{\text{с}} = k_{\text{кр}} k_{\text{з}} = 0,925 \cdot 0,93 = 0,860.$$

Коэффициент, учитывающий добавочные потери при коротком замыкании, $k_{\text{д}}=0,91$ (табл. 3-6).

Изоляционные расстояния главной изоляции обмоток ВН по табл. 4-5: $a_{12}=2,7$ см; $l_0=7,5$ см; $a_{22}=3,0$ см; обмоток НН — по табл. 4-4: $a_{01}=1,5$ см.

Для варианта с потерями $P_{\text{к}}$ по ГОСТ 11920-73 $P_{\text{к}}=18\,000$ Вт предварительно принимаем коэффициент $k_{\text{р}}=0,95$ и определяем $a_{\text{р}}$:

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = k \sqrt[4]{S'} = 0,65 \sqrt[4]{533,3} = 3,12 \text{ см};$$

$$a_{\text{р}} = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} = 2,7 + 3,12 = 5,82 \text{ см};$$

$$A = 16 \sqrt[4]{\frac{S' a_{\text{р}} k_{\text{р}}}{f u_{\text{р}} B_{\text{с}}^2 k_{\text{с}}^2}} = 16 \sqrt[4]{\frac{533,3 \cdot 5,82 \cdot 0,95}{50 \cdot 6,4 \cdot 1,60^2 \cdot 0,860^2}} = 23,76.$$

Ориентировочные предельные значения диаметра стержня для принятых значений $\beta=1,2 \div 3,0$:

$$d_{\text{макс}} = A \sqrt[4]{\beta_{\text{макс}}} = 23,76 \sqrt[4]{3,0} = 31,3 \approx 32 \text{ см};$$

$$d_{\text{мин}} = A \sqrt[4]{\beta_{\text{мин}}} = 23,76 \sqrt[4]{1,2} = 24,9 \approx 24 \text{ см}.$$

Выбираем из нормализованного ряда диаметры: $d_1=24$ см; $d_2=26$ см; $d_3=28$ см; $d_4=30$ см; $d_5=32$ см.

Определяем:

$$D_1 = 4,44 \frac{\pi}{4} \cdot 10^{-4} f B_{\text{с}} k_{\text{с}} = 174,27 \cdot 10^{-4} \cdot 1,60 \cdot 0,860 = 2,398 \cdot 10^{-2};$$

$$D_2 = \frac{0,463 k_{\text{д}}}{S} = \frac{0,463 \cdot 0,91}{1600} = 2,633 \cdot 10^{-4}.$$

Для обмотки НН число витков на стержень

$$w_1 = \frac{U'_1}{D_1 d^3} = \frac{399 \cdot 10^2}{2,398 d^3}.$$

В соответствии с указаниями § 5-7 выбираются конструкции обмоток: для НН — витковые двухходовые, для ВН — непрерывные

катушечные со сдвоенными катушками. Принимаются для обмотки ВН каналы между двойными катушками $h_k=0,5$ см; шайбы в двойных катушках $\delta_{ш}=0,2$ см, бумажная изоляция провода $\delta=0,05$ см на две стороны. Уточнение радиального размера обмотки НН проводится по формуле для двухходовой винтовой обмотки из табл. 12-4 с заменой коэффициента в знаменателе 1,1 на 0,9 (два канала по 0,4 см, изоляция на двух проводах — 0,1 см). Коэффициенты $k_{\text{рад}}$ и $k_{\text{раз}}$ принимаются по табл. 12-5 ($k_{\text{рад}}=1,2$ и $k_{\text{раз}}=1,1$):

$$a_1 = \frac{S' k_{\text{рад}} k_{\text{раз}} \cdot 10}{D_1^2 D_2 P_K \left(\pi A^4 - 0,9 \frac{\omega_1 d^3}{a} \right)}$$

Уточнение радиального размера обмотки ВН проводится по формуле для непрерывной катушечной обмотки со сдвоенными катушками из табл. 12-4. Коэффициенты $k_{\text{пер}}=1,05$; $k_{\text{рад}}=1,3$ и $k_{\text{раз}}=1,10$ приняты по табл. 12-5:

$$a_2 = \frac{S' k_{\text{пер}} k_{\text{рад}} k_{\text{раз}} \cdot 10 \left(1 + \frac{0,4}{b_2} \right)}{D_1^2 D_2 P_K \pi A^4}$$

Ранее рассчитанное значение A было необходимо для определения предельных значений диаметров стержня рассчитываемых трансформаторов. Для второго этапа расчета — для уточнения радиальных размеров обмоток — необходимо определить значения A , соответствующие различным принятым значениям P_K . При этом будут получены также различные значения k , a и b

P_K , Вт	k	a
14 000	$0,57 \cdot 1,25 = 0,713$	$1,45 \cdot 1,06 = 1,54$
16 000	$0,545 \cdot 1,25 = 0,68$	$1,425 \cdot 1,06 = 1,51$
18 000	$0,52 \cdot 1,25 = 0,65$	$1,40 \cdot 1,06 = 1,48$
20 000	$0,49 \cdot 1,25 = 0,613$	$1,37 \cdot 1,06 = 1,45$

Для найденных значений k находятся соответствующие значения a_r и затем A . При этом учитывается, что коэффициент $k_{\text{кр}}=0,928$ для диаметров 28, 30 и 32 см (табл. 2-1).

После уточнения значений A по формулам табл. 12-4 находятся 20 значений a_1 и a_2 ; по (12-15) — (12-17) уточняются значения a_r ,

a и b ; по формуле $\beta = \left(\frac{d}{A} \right)^4$ находятся 20 значений β ; по формулам

(3-35), (3-36), (3-43), (3-44), (3-52) и (3-65') находятся коэффициенты A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 , M ; по (3-46), (3-50), (8-32) и (8-44) — массы стали и металла обмоток $G_{\text{ст}}$ и G_o , потери и ток холостого хода P_x и i_o . Затем находятся для всех вариантов высота обмотки l , высота стержня l_c и расстояние между осями стержней C .

В дальнейшем расчете по методике § 1-4 находятся отнесенные к одному году капитальные затраты на изготовление обмоток трансформатора Z_o , остова трансформатора $Z_{\text{ст}}$ и системы охлаждения $Z_{\text{охл}}$, а также годовые издержки на покрытие постоянных потерь холостого хода $I_{\text{х}}$, переменных потерь короткого замыкания I_K и на компенсацию реактивной мощности I_p .

**Основные результаты расчета трансформатора
новой серии ТМ-1600/35**

Величина	Потери P_K , кВт	Диаметр стержня, см				
		21	26	23	30	32
Радиальный размер НН a_1 , см	14	3,62	3,76	3,90	4,05	4,20
	16	3,30	3,44	3,55	3,70	3,85
	18	3,05	3,18	3,30	3,44	3,58
	20	2,88	3,02	3,14	3,26	3,42
Радиальный размер ВН a_2 , см	14	4,78	4,87	4,87	4,87	5,10
	16	4,38	4,38	4,58	4,81	5,08
	18	4,18	4,39	4,63	4,79	5,08
	20	4,19	4,45	4,73	5,05	5,25
$a=d_{12}/d$	14	1,54	1,51	1,485	1,46	1,44
	16	1,52	1,49	1,46	1,44	1,42
	18	1,49	1,465	1,44	1,42	1,40
	20	1,48	1,45	1,43	1,41	1,395
A	14	23,60	23,85	23,74	23,89	23,93
	16	23,34	23,40	23,52	23,66	23,80
	18	23,17	23,30	23,44	23,55	23,71
	20	23,12	23,27	23,42	23,58	23,71
B	14	1,069	1,451	1,935	2,527	3,198
	16	1,118	1,525	2,010	2,587	3,266
	18	1,150	1,551	2,036	2,634	3,319
	20	1,162	1,557	2,044	2,62	3,319
Масса стали магнитной системы $G_{ст}$, кг	14	1779,0	1893,7	2052,5	2245,8	2474,7
	16	1712,4	1821,5	1999,5	2206,2	2448,5
	18	1656,7	1794,6	1971,9	2170,6	2414,9
	20	1640,2	1770,8	1963,1	2169,8	2416,0
Потери холостого хода P_x , Вт	14	3024	3211	3490	3792	4173
	16	2910	3088	3383	3726	4125
	18	2815	3027	3335	3664	4070
	20	2786	3002	3320	3663	4073
Ток холостого хода i_0 , %	14	1,115	1,321	1,560	1,827	2,129
	16	1,109	1,305	1,548	1,818	2,123
	18	1,097	1,299	1,542	1,810	2,116
	20	1,093	1,294	1,540	1,810	2,116
Высота стержня l_c , см	14	123,5	98,5	82,3	69,5	62,3
	16	117,0	94,5	78,7	67,3	58,6
	18	113,0	92,0	77,1	66,0	57,4
	20	111,0	91,0	76,5	65,7	57,3

Величина	Потери P_k , кВт	Диаметр стержня, см				
		24	26	28	30	32
Расстояние между осями C , см	14	52,20	54,66	56,94	59,24	62,0
	16	50,76	53,04	55,66	58,42	61,26
	18	49,86	52,54	55,26	57,86	60,72
	20	49,54	52,34	55,14	58,02	60,74
Масса металла обмоток G_0 , кг	14	540,0	442,4	361,1	304,0	260,0
	16	460,3	376,9	305,4	258,8	221,2
	18	393,2	323,9	264,7	223,7	191,1
	20	349,1	285,5	234,4	198,5	171,6
Плотность тока Δ , А/мм ²	14	1,35	1,49	1,65	1,80	1,95
	16	1,56	1,73	1,92	2,08	2,26
	18	1,79	1,97	2,18	2,38	2,57
	20	2,01	2,22	2,45	2,66	2,86
Затраты на обмотки $Z_{об.тр.}$, руб/год	14	325,3	266,5	217,5	183,1	156,6
	16	277,3	227,0	184,0	155,9	133,2
	18	236,8	195,1	159,4	134,7	115,1
	20	210,3	172,0	141,2	119,2	103,3
Затраты на остов $Z_{ст.тр.}$, руб/год	14	230,5	251,1	272,2	297,8	328,1
	16	227,0	241,4	265,2	292,5	324,7
	18	219,6	238,0	261,4	287,8	320,2
	20	217,4	234,8	260,3	287,7	320,3
Затраты на систему охлаждения $Z_{охл.тр.}$, руб/год	14	50,3	50,6	51,4	52,3	53,4
	16	55,6	56,1	57,0	58,0	59,2
	18	61,2	61,8	62,7	62,2	64,9
	20	67,0	67,6	68,6	69,6	70,8
Затраты на потери короткого замыкания Z_k , руб/год	14	490,0	490,0	490,0	490,0	490,0
	16	560,0	560,0	560,0	560,0	560,0
	18	630,0	630,0	630,0	630,0	630,0
	20	700,0	700,0	700,0	700,0	700,0
Затраты на потери холостого хода Z_x , руб/год	14	260,1	276,1	300,1	326,1	358,9
	16	250,3	265,6	290,9	320,4	354,8
	18	242,1	260,3	286,8	315,1	350,0
	20	239,6	258,2	285,5	315,0	350,3
Затраты на реактивную мощность Z_p , руб/год	14—	19,4	23,0	27,3	32,0	37,4
	20					
Общие приведенные затраты Z , руб/год	14	1375,6	1357,3	1358,5	1381,3	1424,4
	16	1389,6	1373,1	1384,4	1418,8	1469,3
	18	1409,1	1408,1	1427,6	1461,8	1517,6
	20	1453,7	1455,5	1482,9	1523,9	1582,1

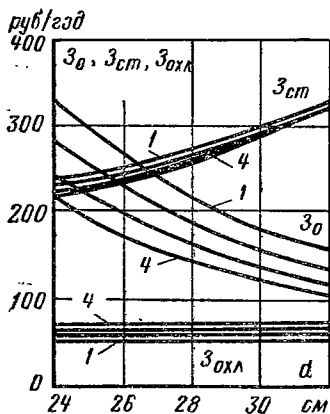


Рис. 12-6. Изменение отнесенных к одному году капитальных затрат на изготовление: обмоток 3_0 , остова $3_{ст}$ системы охлаждения $3_{охл}$ при изменении диаметра стержня d и потерь P_K от P_{K1} до P_{K4} .

$P_{K1}=14$ кВт, $P_{K2}=16$ кВт, $P_{K3}=18$ кВт, $P_{K4}=20$ кВт.

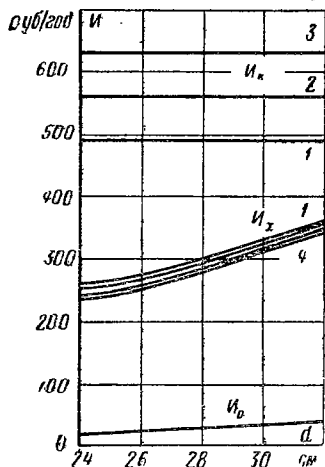


Рис. 12-7. Изменение годовых издержек на оплату потерь холостого хода I_x , короткого замыкания I_K и реактивной энергии I_D с изменением диаметра стержня d и потерь P_K от P_{K1} до P_{K4} .

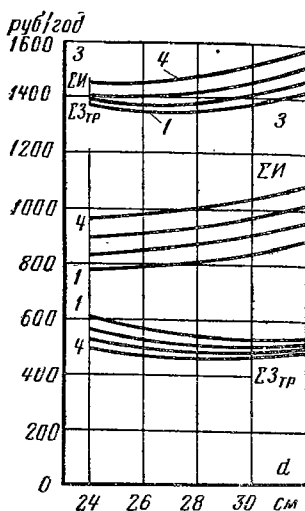


Рис. 12-8. Изменение годовых затрат: капитальных $\Sigma Z_{тр}$, издержек в эксплуатации $\Sigma И$ и приведенных затрат Σ с изменением диаметра стержня и потерь P_K от P_{K1} до P_{K4} .

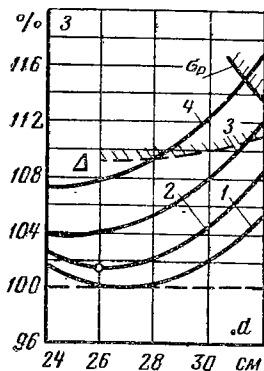


Рис. 12-9. Выбор оптимального варианта — диаметра стержня и уровня потерь короткого замыкания P_K от P_{K1} до P_{K4} .

Полные приведенные затраты Z находятся по формуле

$$Z = Z_0 + Z_{\text{ст}} + Z_{\text{охл}} + I_x + I_k + I_p.$$

Основные результаты расчета приведены в табл. 12-6.

На рис. 12-6 показаны графики изменения составляющих капитальных затрат на изготовление трансформатора Z_0 , $Z_{\text{ст}}$ и $Z_{\text{охл}}$ с изменением диаметра стержня для четырех значений потерь короткого замыкания: 1 — 14 кВт, 2 — 16 кВт, 3 — 18 кВт, 4 — 20 кВт. На рис. 12-7 показаны графики изменения годовых издержек на эксплуатацию трансформатора I_x , I_k и I_p . Отдельные составляющие годовых затрат на рис. 12-6 и 12-7 изменяются существенно, однако графики суммарных капитальных затрат $\Sigma Z_{\text{тр}} = Z_0 + Z_{\text{ст}} + Z_{\text{охл}}$, так же как и суммарных годовых издержек $\Sigma I = I_x + I_k + I_p$, показанные на рис. 12-8, имеют более спокойный характер. Общие затраты Z (рис. 12-8) имеют минимум между значениями диаметра 26 и 28 см при потерях короткого замыкания $P_k = 14$ кВт.

Графики приведенных затрат, построенные на рис. 12-9, позволяют выбрать оптимальный вариант рассчитанного трансформатора. Минимальные затраты имеют два варианта при диаметрах стержня 26 и 28 см и потерях короткого замыкания $P_k = 14\ 000$ Вт. Можно, однако, рекомендовать вариант $d = 26$ см и $P_k = 16\ 000$ Вт, так как он отличается по годовым затратам от первых двух вариантов не более чем на 1,0—1,1%, но позволяет по сравнению с первым из этих вариантов уменьшить массу металла обмоток на 66 кг и стали магнитной системы на 72 кг, а по сравнению со вторым — при увеличении массы металла обмоток только на 16 кг уменьшить массу стали на 231 кг. Современный трансформатор этого типа, отвечающий требованиям ГОСТ 11920-73, имеет $d = 26$ см и потери короткого замыкания в зависимости от номинального напряжения обмоток НН 16 500 или 18 000 Вт.

Предельно допустимые для алюминиевых обмоток механические напряжения при коротком замыкании σ_p и предельное значение плотности тока Δ в данном случае ограничивают относительно небольшую зону неприемлемых решений в правой верхней части графиков. При расчете всех трансформаторов серии окончательный выбор оптимальных вариантов должен быть сделан по графику типа приведенных на рис. 12-5.

Краткий анализ графиков, показанных на рис. 12-8, позволяет сделать заключение о том, что наибольшую часть из приведенных затрат (до 65%) составляют издержки в эксплуатации на оплату потерь короткого замыкания и холостого хода и реактивной мощности. При этом издержки на оплату потерь короткого замыкания составляют также около 65% всех годовых издержек, входящих в приведенные затраты (рис. 12-7). По-видимому, уменьшение потерь короткого замыкания может дать существенный эффект в деле снижения приведенных затрат и повышения экономической эффективности силовых трансформаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. Петров Г. Н. Трансформаторы. М., ОНТИ, 1934. 446 с.
2. Петров Г. Н. Электрические машины. Ч. I, М., «Энергия», 1974. 240 с.
3. Сапожников А. В. Конструирование трансформаторов. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959. 360 с.
4. Герасимова Л. С., Дейнега И. А. Технология и оборудование производства трансформаторов. М., «Энергия», 1972. 264 с.
5. Тихомирсов П. М. Расчет трансформаторов. М., «Энергия», 1968. 456 с.
6. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. Л., «Энергия», 1970. 432 с.
7. Голунов А. М. Охлаждающие устройства масляных трансформаторов. М., «Энергия», 1964. 152 с.

Литература по расчету механических сил

8. Лурье С. И. Осевые усилия в обмотках трансформаторов. — «Электричество», 1972, № 4, с. 23—31.
9. Лурье С. И., Левицкая Е. И. Электродинамическая прочность трансформаторов I—II габаритов со слоевыми цилиндрическими обмотками. — «Электротехника», 1967, № 4, с. 14—18.
10. Лурье С. И., Мильман Л. И. Механические свойства трансформаторного электрокартона. — «Вестник электропромышленности», 1963, № 1, с. 46—50.
11. Зенова В. П., Иванова Н. С., Лурье С. И., Мильман Л. И. Электродинамическая устойчивость наружных обмоток трансформаторов больших мощностей. — «Электричество», 1971, № 10, с. 1—6.
12. Мильман Л. И. и Лурье С. И. Проводниковые материалы при динамическом изгибе. — «Электротехника», 1966, № 9, с. 47—49.
13. Мильман Л. И. и Лурье С. И. Расчет прочности внутренних обмоток трансформаторов при действии радиальных усилий короткого замыкания. — «Электричество», 1965, № 8, с. 77—83.

Литература по расчету поля рассеяния

14. Лурье С. И., Савельев М. П., Хубларов Н. Н. Подготовка и контроль исходных данных и представление результатов в новой программе расчета поля рассеяния трансформаторов на ЭЦВМ «Минск-22». — «Электротехническая промышленность», 1971, вып. 6, с. 22—26.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

- Автотрансформатор 61, 97
- трехобмоточный 61, 91
- Активная часть трансформатора 63
- — — стоимость 131—132
- Активное сечение стержня 69, 87
- — — расчет 359—364
- — — ярма 69, 87
- — — расчет 364
- Амортизационные отчисления 33, 34
- Анизотропия магнитных свойств стали 83
- Атмосферные перенапряжения 170

Б

- Бак трансформатора 63, 419
- — — основные размеры 427—429
- — — поверхность излучения 429
- — — конвекции 430
- — — расчет бака с навесными радиаторами 437—441
- — — — трубами 434—437
- — — гладкого бака
- — — тепловой 426—431
- — теплоотдача с поверхности 429—431
- Бумага кабельная 175
- крепированная электроизоляционная 175
- телефонная 175
- Бумажно-бакелитовые изделия 176

В

- Ввод трансформатора 66
- Виток обмотки трансформатора 59, 103
- — — конструкция 207

Г

- Гетинакс 177
- Группа соединения обмоток 20

Д

- Дерево (как изоляционный материал) 25, 177
- Диаметр стержня трансформатора 69, 102, 499
- — — нормализованный ряд 81
- — — расчет 162—165
- Диэлектрик газообразный 168
- жидкий 168
- твердый 167

З

- Затраты косвенные в производстве 37
- приведенные годовые 33, 525
- удельные годовые 33, 36
- Защита обмоток от импульсных перенапряжений 193—197

И

- Издержки в эксплуатации ежегодные 33
- Изоляционная конструкция 169
- Изоляционный промежуток (расстояние) 169, 178, 508—509
- — — выбор для главной изоляции 182—187, 203—204
- Изоляция обмоток витковая 187—188, 211
- — — добавочная 222
- — — главная 168
- — — масляных трансформаторов 182—187
- — — сухих трансформаторов 203—205
- — — междукатушечная 190—191

Изоляция обмоток междука-
тушечная конструкция
223—225

- междуслойная 188—189
- — добавочная 223
- — продольная 168
- — масляных трансформа-
торов 187—193
- — сухих трансформаторов
204
- отводов 198—202
- трансформатора 165
- — главная, испытания 165
- — испытания 170
- — продольная, испытания
171

Индукция в магнитной системе
25, 89, 109, 116

- — — — — выбор 89, 499, 503

Исходные данные расчета 106,
116, 139, 512

К

Калькуляция себестоимости
трансформатора заводская
37

- — — — — упрощенная 38

Капитальные вложения в транс-
форматор 32

Картон электроизоляционный
25, 176

Катушка обмотки 208

Класс напряжения обмотки 97,
168

- трансформатора 168

Кожух сухого трансформатора
67

Коэффициент заполнения круга
74, 81

- — сечения стержня 87

- — сталью 87, 116, 505, 508

— приведения идеального поля
рассеяния к реальному 117, 327

- усиления ярма 78, 125, 366

— эффективности капитальных
вложений нормативный 33

Л

Лакоткань электроизоляцион-
ная хлопчатобумажная 175

Лента хлопчатобумажная 175

М

Магнитная индукция основно-
го поля 89, 116

Магнитная индукция поля рас-
сеяния 337

- — — — — расчет 349—352

— система трансформатора
(магнитопровод) 47, 69,
101, 358

- — — — — броневая 49

- — — — — бронестержневая 49

- — — — — плоская 49, 55, 101

- — — — — расчет 359—365

- — — — — пространственная 49

- — — — — навитая 51, 57, 73,
126

- — — — — расчет 372—373

- — — — — стыковая 57, 73, 125

- — — — — расчет 371—372

- — — — — расчет 358—373

- — — — — симметричная 51

- — — — — стержневая 49, 69, 101

- — — — — стыковая 51, 74, 125

- — — — — шихтованная 51, 70

Материалы трансформатора ак-
тивные 25, 103, 169

- — — — — конструкционные 25, 169

- — — — — основные 38

- — — — — электроизоляционные 25,
169, 174—177

Мощность автотрансформатора
типовая 97

— трансформатора намагничи-
вающая 135

- — — — — расчет для горячеката-
ной стали 391

- — — — — навитой простран-
ственной магнитной систе-
мы 399

- — — — — стыковой прост-
ранственной магнитной си-
стемы 397—398

- — — — — холоднокатаной
стали и плоской магнитной
системы 391—397

- — — — — реактивная 33

Н

Направление намотки обмотки
209—210

Напряжение испытательное 97,
139

- короткого замыкания авто-
трансформатора 99, 331

- — — — — трансформатора 324

- — — — — активная составля-
ющая 97, 140

- — — — — расчет 325

- Потери в элементах конструкции от поля рассеяния 320—322
- короткого замыкания трансформатора 97, 128, 308—306, 504, 506
- — — — — расчет 306—324
- холостого хода трансформатора 84, 116, 134, 373, 501
- — — — — для горячекатаной стали 375
- — — — — навитой магнитной системы 388—389
- — — — — плоской магнитной системы 375—384
- — — — — пространственной стыковой магнитной системы 385—388
- — — — — холоднокатаной стали 376
- Превышение температуры 413
- масла в верхних слоях над воздухом 418, 442
- — — среднее над воздухом 413
- — — над стенкой бака 442
- — — обмотки над воздухом 418
- — — — — маслом 413
- — — предельные нормы 418
- — — стенки бака над воздухом 442
- Прессовка стержней магнитной системы 72
- ярм магнитной системы
- Прессующая пластина стержня 76, 364
- Приведенный канал рассеяния 118, 327
- Провод обмоточный алюминиевый 213—218
- — — сортамент 213, 216—217
- — — медный 211—217
- — — сортамент 211, 214, 217
- — — транспонированный 219—221

Р

- Радиатор 64, 415
- Расширитель трансформатора 66
- Регулирование напряжения трансформатора 12, 277
- — — переключение без возбуждения (ПБВ) 278

- Регулирование напряжения трансформатора под нагрузкой (РПН) 278
- — — — — схемы регулирования ПБВ 279—280
- — — — — РПН 281—283

С

- Серия трансформаторов 106, 109, 115, 133, 510
- Силы механические в обмотках 136, 332
- — — — — меры ограничения 336, 347
- — — — — осевые 335
- — — — — расчет 338—346
- — — — — радиальные 136
- — — — — расчет 337
- Система заземленных частей трансформатора 165
- обмоток трансформатора 47
- — — охлаждения трансформатора 42, 47, 414
- Слой витков обмотки 207
- Совтол 68, 177
- Соединение обмоток в звезду 95
- — — — — зигзаг 95—96
- — — — — треугольник 95
- Срок окупаемости капитальных вложений 33
- — — — — нормативный 33
- Сталь электротехническая горячекатаная 25, 81, 374, 391
- — — холоднокатаная 25, 81, 374, 391
- Стеклолакоткань электроизоляционная 175
- Стержень магнитной системы трансформатора 47, 69, 101
- Стоимость активной части трансформатора 42
- трансформатора 44
- Стык пластин косой 53, 84
- — — — — прямой 53, 84
- Сушка трансформатора 173
- Схема соединения обмоток 20

Т

- Тип трансформатора 510
- Ток короткого замыкания трансформатора 332
- — — — — мгновенный максимальный 333
- — — — — установившийся 332

Ток холостого хода трансформатора 85, 116, 134, 502
 — — — — расчет 134, 389
 Транспозиция параллельных проводов 248
 — — — в винтовой обмотке 248—250
 — — — — непрерывной катушечной обмотке 254
 Трансформатор 47
 — двухобмоточный 59, 92, 101, 116
 — общего назначения 47
 — силовой 47
 — трехобмоточный 61, 91, 125
 Трансформаторное масло 25, 63, 177

У

Угловая шайба 184, 225
 Угол магнитной системы 122, 127, 369
 Удельная намагничивающая мощность 85, 135, 390, 392, 395, 502
 Удельные потери в стали 83, 85, 134, 374, 376, 377, 501

Ф

Фазное напряжение 95
 Фазный ток 95
 Фарфор (как изоляционный материал) 25, 177
 Фольга (лента) алюминиевая 222, 237

Ц

Цилиндры изоляционные 182, 225

Э

Электрическая прочность изоляции 97

Я

Ярмо магнитной системы трансформатора 48, 76, 122, 364
 — — — — навитой 372
 — — — — стыковой пространственной 371, 398
 Ярмовая балка 75

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

Глава первая

Общие вопросы проектирования трансформаторов

1-1. Современные тенденции в производстве трансформаторов в СССР	6
1-2. Стандартизация в трансформаторостроении	16
1-3. Основные материалы, применяемые в трансформаторостроении	24
1-4. Экономическая оценка рассчитанного трансформатора	30

Глава вторая

Конструкции основных частей трансформатора

2-1. Общая конструктивная схема трансформатора	47
2-2. Конструкции магнитных систем силовых трансформаторов	69
2-3. Выбор марки стали и вида изоляции пластин	81

Глава третья

Расчет основных размеров трансформатора

3-1. Задание на проект и схема расчета трансформатора	90
3-2. Расчет основных электрических величин трансформаторов и автотрансформаторов	94
3-3. Основные размеры трансформатора	101
3-4. Методы расчета трансформаторов. Основы обобщенного метода	105
3-5. Проектирование отдельного трансформатора по обобщенному методу	114
3-6. Анализ изменения некоторых параметров трансформатора с изменением β (пример расчета)	138
3-7. Определение основных размеров трансформатора	162

Глава четвертая

Изоляция в трансформаторах

4-1. Классификация изоляции в трансформаторах	167
4-2. Общие требования, предъявляемые к изоляции трансформатора	168
4-3. Электроизоляционные материалы, применяемые в трансформаторостроении	174
4-4. Основные типы изоляционных конструкций	177

4-5. Определение минимально допустимых изоляционных расстояний для некоторых частных случаев (масляные трансформаторы)	181
4-6. Определение минимально допустимых изоляционных расстояний в сухих трансформаторах	203

Глава пятая

Выбор конструкции обмоток трансформаторов

5-1. Общие требования, предъявляемые к обмоткам трансформатора	205
5-2. Конструктивные детали обмоток и их изоляции	207
5-3. Цилиндрические обмотки из прямоугольного провода	229
5-4. Многослойные цилиндрические обмотки из круглого провода	239
5-5. Винтовые обмотки	245
5-6. Катушечные обмотки	253
5-7. Выбор конструкции обмоток	258

Глава шестая

Расчет обмоток

6-1. Расчет обмоток НН	268
6-2. Регулирование напряжения обмоток ВН	277
6-3. Расчет обмоток ВН	284
6-4. Примеры расчета. Расчет обмоток	295

Глава седьмая

Расчет параметров короткого замыкания

7-1. Определение потерь короткого замыкания	306
7-2. Расчет напряжения короткого замыкания	324
7-3. Определение механических сил в обмотках и нагрева обмоток при коротком замыкании	332
7-4. Расчет индукции поля рассеяния	349
7-5. Примеры расчета. Расчет параметров короткого замыкания	352

Глава восьмая

Расчет магнитной системы трансформатора

8-1. Определение размеров магнитной системы	358
8-2. Определение потерь холостого хода трансформатора	373
8-3. Определение тока холостого хода трансформатора	389
8-4. Примеры расчета. Расчет магнитной системы трансформатора	400

Глава девятая

Тепловой расчет трансформатора

9-1. Процесс теплопередачи в трансформаторе	406
9-2. Краткий обзор систем охлаждения трансформаторов	414
9-3. Нормы предельных превышений температуры	418
9-4. Порядок теплового расчета трансформатора	419
9-5. Поверочный тепловой расчет обмоток	420
9-6. Тепловой расчет бака	426
9-7. Окончательный расчет превышений температуры обмоток и масла трансформатора	442
9-8. Приближенное определение массы конструктивных материалов и масла трансформатора	443

9-9. Примеры расчета. Тепловой расчет трансформатора типа ТМ-1600/35	444
--	-----

Глава десятая

Примеры расчета трансформаторов

10-1. Пример расчета трехфазного трансформатора типа ТСЗ-250/10, 250 кВ·А с естественным воздушным охлаждением	450
10-2. Пример расчета трехфазного двухобмоточного трансформатора типа ТРДН-25000/110, 25 000 кВ·А, РПН, с масляным охлаждением и дутьем	462
10-3. Пример расчета обмоток трансформатора типа ТМ-630/35	474

Глава одиннадцатая

Анализ влияния исходных данных расчета на параметры трансформатора

11-1. Влияние индукции на массы активных материалов и некоторые параметры трансформатора	498
11-2. Влияние потерь короткого замыкания, коэффициента заполнения k_c и изоляционных расстояний на массу и стоимость активных материалов трансформатора	505

Глава двенадцатая

Проектирование серий трансформаторов

12-1. Выбор исходных данных при проектировании серий	510
12-2. Применение обобщенного метода к расчету серий трансформаторов	515
12-3. Выбор оптимального варианта при расчете серий трансформаторов	525
12-4. Пример расчета трансформатора новой серии	529
Список литературы	536
Предметный указатель	537

Павел Михайлович Тихомиров РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Редактор И. В. Аник
Переплет художника Н. Т. Ярешко
Технический редактор М. П. Осипова
Корректор З. Б. Драговская

Издательство «Энергия», Москва, М-114,
Шлюзовая наб., 10.

Сдано в набор 28/X 1975 г.
Подписано к печати 11/III 1976 г. Т-04498
Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 28,56. Уч.-изд. л. 29,76
Тираж 40 000 экз. Зак. № 359 Цена 1 р. 20к.

Владимирская типография Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров
СССР по делам издательств, полиграфии и
книжной торговли.
Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.